

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА
ШЕВЧЕНКА
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МЕТЕОРОЛОГІЇ ТА КЛІМАТОЛОГІЇ

На правах рукопису

УДК 551.510.42

ДИНАМІКА АЕРОЗОЛЮ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ НАД
ОСУШЕНОЮ ТЕРИТОРІЄЮ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Галузь знань *10 – природничі науки*
Спеціальність *103 – Науки про Землю*
Освітня програма *Метеорологія*

Кваліфікаційна робота бакалавра
студентки 4-го курсу
освітнього рівня бакалавр
Крайник Софії Валеріївни
Науковий керівник:
к.геогр.н. Савенець М.В.

Допустити до захисту:

завідувач кафедри, канд. геогр. н., доц. Затула В.І.

«___» _____ 2024 р.

Київ – 2024

Анотація

Крайник С.В. Динаміка аерозолію в атмосферному повітрі над осушеною територією Каховського водосховища. Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 103 – Науки про Землю, Київський національний університет імені Тараса Шевченка - Київ, 2024. - с. 59, список джерел із 45 найменувань, 3 розділи.

У роботі представлено дослідження зміни параметрів аерозолію в атмосферному повітрі внаслідок додаткового надходження пилу із осушених ділянок Каховського водосховища, що утворилися після підриву греблі 6 червня 2023 р. Розроблено методологію дослідження аерозолів на основі супутникового зондування приладом MODIS. Виявлено основні зміни підстильної поверхні в районі Каховського водосховища із використанням даних супутникового зондування Landsat. Показані характерні зміни параметрів аерозолію в атмосферному повітрі. Встановлено, що найбільш чіткі зміни прослідковуються за масовою часткою аерозолію у вертикальному стовпі атмосферного повітря, зокрема сформувалися нові локальні осередки високого вмісту. Зміни аерозольної оптичної товщі почали прослідковуватися із серпня 2023 р. Внаслідок додаткового надходження пилу над Каховським водосховищем аерозольна оптична товща не зазнала типового сезонного зменшення. Аналіз експоненти Ангстрема показав зростання повторюваності великих часток аерозолію, у тому числі і над піщаними територіями.

Ключові слова: аерозольна оптична товща, масова частка аерозолію, експонента Ангстрема, супутникове зондування

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМАТИКА ВИВЧЕННЯ АТМОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ.....	6
1.1 Аерозолі в атмосфері: джерела, фізичні властивості і методи вимірювань	6
1.1.1 Джерела та властивості аерозолів.....	6
1.1.2 Методи вимірювання аерозолів.....	10
1.2 Сучасний стан досліджень аерозолю в атмосферному повітрі.....	17
1.3 Висновки до Розділу 1.....	22
РОЗДІЛ 2. ПЕРВИННІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ АЕРОЗОЛЮ НАД КАХОВСЬКИМ ВОДОСХОВИЩЕМ.....	23
2.1 Підрив греблі Каховського водосховища та наслідки для навколишнього середовища.....	23
2.2 Вхідна супутникова інформація.....	25
2.3 Методика обробки супутникової інформації та статистичних обчислень.....	29
2.4 Висновки до Розділу 2.....	33
РОЗДІЛ 3. ЗМІНА АЕРОЗОЛЬНОГО ВМІСТУ ВНАСЛІДОК ОСУШЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА	34
3.1 Зміни підстильної поверхні Каховського водосховища та прилеглих територій.....	34
3.2 Мінливість параметрів аерозолю в атмосферному повітрі.....	38
3.3 Висновки до розділу 3.....	52
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	55

ВСТУП

За час повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України здійснено велику кількість екологічних злочинів. Однією із наймасштабніших катастроф стало підриг греблі Каховської ГЕС в ніч з 5 на 6 червня 2023 р. Наслідки підригу продовжують оцінюватися, проте вже зараз стає зрозумілим величезні екологічні та економічні втрати у зв'язку із затопленням значних територій після підригу, знищенням рослинного та тваринного світу, проблемами з нестачею води (у тому числі і для сільського господарства), тощо. У той же час, поряд із найбільш видимими наслідками, існують ряд інших, що здаються незначними, проте які справлятимуть значний негативний вплив у майбутньому. До таких проблем можна віднести появу нових, великих за площею піщаних зон на осушених ділянках Каховського водосховища. Поява нового джерела емісії пилу в атмосферне повітря матиме визначальні наслідки для якості атмосферного повітря прилеглих територій у майбутньому. Незважаючи на очевидність вказаних наслідків, досі ця проблема не була висвітлена.

Враховуючи величезну роль джерел емісії пилу для якості атмосферного повітря та перебігу метеорологічних процесів (прямі і непрямі аерозольні ефекти), постає нагальна потреба у проведенні досліджень зміни аерозольного вмісту над територією колишнього Каховського водосховища. Тому, **метою** даної роботи є встановлення особливостей емісії і варіативності аерозолю в атмосферному повітрі внаслідок осушення території водосховища.

Об'єктом досліджень є атмосферний аерозоль мінерального походження. **Предметом** досліджень – закономірності поширення аерозолю над осушеною територією Каховського водосховища.

Для досягнення мети поставлено наступні **завдання**:

1. Здійснити аналіз та узагальнення сучасних підходів до дослідження вмісту аерозолю в атмосферному повітрі;

2. Враховуючи відсутність наземних спостережень, підготувати дані та розробити методологію досліджень аерозолю на основі супутникового зондування;

3. Встановити особливості зміни підстильної поверхні в районі Каховського водосховища як нового джерела емісії аерозолю;

4. Виявити характерні зміни параметрів аерозолю в атмосферному повітрі та закономірності їх варіацій за даними супутникових спостережень.

Для проведення досліджень використано дані супутникового зондування, які було оброблено із використанням сучасних мов програмування та геоінформаційних систем. Проведені обчислення здійснено стандартними статистичними методами.

Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та переліку використаних джерел (45 найменувань). У роботі наведено 18 рисунків. Загальний обсяг роботи 59 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМАТИКА ВИВЧЕННЯ АТМОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ

1.1 Аерозолі в атмосфері: джерела, фізичні властивості і методи вимірювань

1.1.1 Джерела та властивості аерозолів

Атмосферні аерозолі — це частки рідкого або твердого фазового стану, що перебувають у атмосферному повітрі, розміром від нанометрів до десятків або навіть сотень мікрометрів. Вони різноманітні за формою та хімічним складом і можуть мати різні оптичні (взаємодія із сонячним випромінюванням) та гігроскопічні (взаємодія із водяною паром) властивості. [24]

Аерозолі можуть бути первинного та вторинного походження. Первинні аерозолі надходять прямо в атмосферу від різноманітних джерел викидів, тоді як вторинні утворюються внаслідок фотохімічних реакцій або після процесів конденсації газових складових органічного походження [36]. Велика частина вторинних аерозолів є гігроскопічними та утворюються за високої відносної вологості (понад 60%). Формування інших пов'язано із наявністю короткоживучих хімічних складових, наприклад пероксиди та вільні радикали.

Основними джерелами емісії аерозолі у повітря є продукти згорання біомаси та викопного палива, вітрова ерозія та піщані бурі, надходження морської солі з морських поверхонь, вулканічна діяльність, та інші. Час перебування цих частинок в атмосфері може змінюватися, значною мірою залежно від їх характеристик: розміру частинок, складу та мікросередовища, де вони знаходяться в повітрі [44].

Значна частина первинного природного аерозолі утворюється внаслідок ерозії ґрунту вітром (емісія мінерального пилу). Ці процеси є короткотривалими і можуть сприяти нерегулярній емісії, коли сильні вітри над ґрунтом поєднуються із тривалими посушливими періодами. Типові швидкості седиментації становлять приблизно 0,3 см/с для частинок розміром 10 мкм і 30

см/с для частинок 100 мкм (відповідають розміру найменших крапельок). Типова швидкість висхідного потоку за умов сильного вітру може становити >1 м/с, в результаті чого частинки можуть залишатися у зваженому стані протягом значних періодів часу та переноситися на великі відстані перед осадженням [30].

Основні джерела мінерального пилу знаходяться у пустельних районах північної півкулі, зокрема на Аравійському півострові, південному заході США, пустелі Гобі та Сахара із загальними викидами близько 1500 Мт щороку [19]. Процес емісії з цих районів триває постійно, але особливу увагу до перенесення мінерального пилу звертають під час його надходження у населені регіони, що супроводжується погіршенням якості атмосферного повітря. Близько 100 Мт пилу щороку надходить із Сахари, і частина дощів у південній Європі пов'язана із конденсацією водяної пари на цих часточках, що формує червоний колір опадів. Зазвичай, частинки ґрунту, які захоплюються вітром, мають тенденцію до двох формування різних діапазонів розмірів. Високодисперсна фракція, в основному, складається із зерен кварцу розміром 10–200 мкм, які, як правило, осідають поблизу джерела, тоді як дрібнодисперсні частки в діапазоні менше 10 мкм можуть переноситися на значні відстані. Вимірювання концентрації пилу у забрудненому повітрі в Сахарі показало, що поблизу джерела переважна маса частинок була в діаметрі понад 50 мкм. Цей показник постійно зменшувався з відстанню, доки не становив лише 2–3 мкм на відстанях більше 5000 км. Ці частинки, як правило, є найпоширенішими оксидами заліза, алюмінію, кремнію та титану. Було підраховано, що 1,4 Мт кальцію, що міститься в 24 Мт пилу, який надходить з європейських ґрунтів щороку, було б достатньо для нейтралізації 10% річних викидів SO_2 . Емісія може бути значною – вимірювання показали потужність джерела до 10^{-6} см³ частинок на 1 см² ґрунту за секунду, що еквівалентно приблизно 1 мм глибини ґрунту.

Іншим основним природним джерелом частинок у повітрі є випаровування крапель морської води [35]. Кожного разу, коли хвиля розривається або лопаються бульбашки в океанах, у повітря викидається багато крапель. Для тих, що залишаються у зваженому стані, вода випаровується і залишає кристали солі.

Таким чином щороку утворюється приблизно 3 мільярди тонн частинок морської солі. Середній масовий діаметр цих частинок солі біля поверхні моря становить близько 8 мкм. Їх хімічний склад точно відповідає складу розчинених речовин у поверхневій морській воді, тобто 55% Cl^- , 31% Na^+ , 7,7% SO_4^{2-} , 3,7% Mg^{2+} , 1,2% Ca^{2+} і 1,1% K^+ . Ці іони існують переважно у вигляді солей NaCl , KCl , CaSO_4 і Na_2SO_4 .

Інші первинні природні джерела включають вулкани, лісові пожежі, надходження біогенних елементів таких як спори та пилок рослин. Природні процеси також беруть участь у вторинному формуванні під час фізичних і хімічних трансформацій газів на частинки. Фізичні трансформації включають, наприклад, конденсацію терпенів і піненів у лісистих районах; хімічні – формування аерозолу сірчаної кислоти з SO_2 , диметилсульфіду (CH_3SCH_3) і сірководню (H_2S). Навіть у стратосфері аерозоль сірчаної кислоти утворюється шляхом фотодисоціації карбонілсульфіду (COS) на CO та S [26].

Існує велика кількість і антропогенних джерел викидів аерозолу, до яких призводять різноманітні види діяльності, такі як процеси спалювання палива, плавлення в металургійній промисловості, технологічні процеси подрібнення, сільськогосподарська діяльність (напр., оброблення землі), тощо [41]. Такі процеси утворюють частинки різних розмірів, найменші з яких залишаються підвішеними в атмосферному повітрі впродовж довгого часу.

Антропогенні процеси спалювання палива (включаючи автотранспорт) складають 95% від усього спалювання біомаси протягом останніх кількох десятиліть. В результаті такої діяльності надходить суміш сажі, сульфатів, нітратів і вуглеводнів [19]. Дизельні двигуни автомобілів та мікроавтобусів викидають близько 5 г часток на літр палива, тоді як для більш важких транспортних засобів цей показник зростає приблизно до 12 г. Натомість автомобілі з бензиновими двигунами без каталізаторів викидають лише близько 0,5 г. Вплив цих викидів, звичайно, також залежить від розподілу аерозольних частинок за розміром. Вторинні джерела надходження аерозолу включають утворення сульфатних та нітратних частинок, хімічно перетворених з первинних

газових викидів і органіки від викидів летких органічних сполук (ЛОС). Таким чином, загальна емісія аерозолів складає $5,5 \times 10^9$ т.

В результаті неповного згоряння викопного палива утворюється сажа (англ.: black carbon), що з часом привернула найбільшу увагу громадськості. У 1989 році викиди сажі з дизельних двигунів автомобільного транспорту вперше досягло рівня побутових викидів. На сьогодні це є основним джерелом сажі, хоча кількість його поступово зменшується [19].

Розмір частинок є важливим параметром, який визначає хімічний склад, оптичні властивості, осадження частинок і їх вплив під час дихання на респіраторну систему людини. Атмосферні частки існують широкому діапазоні розмірів, від кількох десятків ангстрем (Å) до сотень мікрометрів (мкм) [27].

На основі розміру часток можна виділити кілька основних категорій: (1) ядра Айткена або дрібнодисперсні частки, що є найдрібнішими у повітрі; (2) мода акумуляції; (3) грубодисперсні частки. В останньому випадку найбільшу увагу звертають на частинки розміром 2,5 мкм та 10 мкм (англ.: particulate matter – $\text{PM}_{2,5}$ і PM_{10}), через їх здатність потрапляти у дихальні шляхи людини. Ядра Айткена є частинки з діаметром від 10 нм до 100 нм. Мода акумуляції – це частинки діаметром від 0,1 мкм до 1 мкм.

Для опису розподілу частинок за розмірами використовується логарифмічний нормальний закон розподілу [27]. Розподіл аерозолів за розмірами є важливим параметром, який визначає динаміку аерозолів в атмосфері, їх перенесення, осадження та час перебування. Часто для опису аерозолів використовують показник об'ємного вмісту. Розподіл за об'ємом зазвичай бімодальний з мінімумом ~ 1 мкм (межа поділу між грубодисперсними та дрібними частинками). Арифметичний розподіл за кількістю має максимум в спектрі дрібнодисперсних частинок, тоді як розподіл за площею поверхні характеризується максимумом в спектрі моди акумуляції.

Розділення дрібних і грубих частинок є визначальним фактором, оскільки частинки в цих двох діапазонах розмірів відрізняються за своїм джерелом, хімічним складом, процесами виведення з атмосфери, оптичними властивостями

та впливом на здоров'я людини. Таким чином, існують дві основні категорії частинок, які вимагають індивідуального вивчення та потребують різних законодавчих критеріїв для захисту екосистем і населення. В спектрі між 1 мкм і 3 мкм важливо розрізнати саме походження частинок.

Аерозольні частинки впливають на енергетичний баланс земної атмосфери, вони безпосередньо взаємодіють із сонячним випромінюванням, забезпечуючи прямий радіаційний вплив на клімат. Деякі з них діють як ядра конденсації в хмарі і впливають на процеси хмароутворення, визначаючи мікрофізичні та радіаційні властивості хмари. В кінцевому підсумку впливають на відбивну здатність хмари, що забезпечує непрямий радіаційний ефект [32].

1.1.2 Методи вимірювання аерозолів

Існує низка методів вимірювання аерозолів в атмосфері [19], серед яких: волога хімія зібраних масових зразків, атомна абсорбція, оптична та електронна мікроскопія, рентгенівська флуоресценція, та інші.

Волога хімія зібраних масових зразків: частинки накопичуються на фільтрі, як правило, протягом принаймні кількох годин і аналізуються за допомогою повного спектру хімічних лабораторних методів. Цей метод використовувався для дослідження фотохімічного утворення сульфату та нітрату амонію, утворення частинок морської солі з крапельок океану, забруднення фтором з точкових джерел.

Атомна абсорбція зазвичай використовується для аналізу металів; іонна хроматографія для таких іонів, як натрій і кальцій; спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP) може давати дані щодо 20 видів важких металів одночасно. Нейтронно-активаційний аналіз (NAA) може давати до 35 показників. Зразок опромінюється тепловими нейтронами з ядерного реактора, що робить невелику частину стабільних атомних ядер радіоактивними. Вихідні присутні елементи можна визначити шляхом вимірювання радіоактивності. Зазвичай випромінювані γ -промені вимірюються спектрометром, а елементи ідентифікуються за місцем виникнення та сила ліній в спектрі γ -променів. Також

можна визначити вміст вуглецю (шляхом екстракції розчинником або термічного розкладання). Для напівлетких сполук, таких як нітрат амонію, випаровування зібраних частинок у присутності змінних концентрацій газоподібного компонента перед аналізом є джерелом значних похибок.

Оптична мікроскопія: дослідження окремих частинок, що використовується для визначення походження. Для порівняння доступні колекції фотографій відомих матеріалів. Стандартну мікроскопію можна покращити за допомогою таких методів, як поляризаційні фільтри.

Скануюча електронна мікроскопія (SEM): не тільки дає тривимірні зображення частинок, що робить візуальну ідентифікацію простішою, але прилад можна використовувати з низкою прикріплених аналітичних пристроїв, таких як енерго-дисперсійний аналіз Рентгенівські промені (EDAX), які дають потужний метод проведення хімічного аналізу окремих частинок після того, як вони були зібрані на підкладку. Просвічуюча електронна мікроскопія (TEM) використовує також колекції мікрофотографій доступні для порівняння.

Рентгенівська флуоресценція (XRF): дозволяє проводити багатоелементний об'ємний аналіз зразків аерозолі. Частинки спочатку збираються на мембранному фільтрі. Фотони (рентгенівські промені) використовуються, щоб вибити електрон на внутрішній орбіті з атома. Вільна орбіталь заповнюється зовнішнім електроном, а надлишок енергії зв'язку виділяється у вигляді рентгенівського випромінювання. Енергія рентгенівського випромінювання визначається різницею між енергіями двох орбіт, і, отже, спектроскопічний аналіз дає задіяний елемент із визначенням усіх елементів одночасно. Елементи з атомними номерами менше 12 неможливо визначити цим методом, оскільки він виключає багато екологічно важливих елементів, таких як натрій і магній. Методи визначення енергії визначаються за довжиною хвилі або енергодисперсію (EDXRF), причому остання є більш вживаною, оскільки вона дешевша. Межі виявлення для обох методів знаходяться в діапазоні 1–10 мкг/г.

Протонно-індуковане рентгенівське випромінювання (PIXE): у цьому методі важкі заряджені частинки, такі як протони 1–4 МеВ, використовуються

для створення рентгенівської флуоресценції замість фотонів. Рентгенівський спектр вимірюється енергодисперсійним детектором. Мінімальна маса зразка нижче, а межа виявлення на порядок менша, ніж для EDXRF (до pg g^{-1}), хоча неможливість відібрати легкі елементи залишається.

Лазерна мікрозондова мас-спектрометрія: частинки, зібрані на підкладці, опромінюються лазером високої потужності. Викинуті іонні фрагменти потім аналізуються мас-спектрометром. Слідові рівні металів можна виявити на рівні часток на мільйон в окремих частинках, можна визначити неорганічні сполуки, такі як нітрати та сульфати, а поверхневі види можна відрізнити від тих, що знаходяться в тілі частинки.

Ці методи дають лише склад з точки зору хімічних елементів, а не сполук, хоча багато чого можна зробити із співвідношення компонентів. Подальшим обмеженням є те, що дослідження статистично значущої кількості окремих частинок може бути трудомістким і трудомістким. Очевидно, що не існує простого єдиного методу, який дав би інформацію, необхідну для повної характеристики хімії елементарних частинок. Щоб створити якомога повнішу картину, необхідно використовувати додаткові методи. Навіть коли це було зроблено, слід пам'ятати, що повторний відбір зразків в іншу пору року або в іншому місці, ймовірно, дасть інші результати [19].

Моніторинг є однією з найбільших проблем, з якими стикаються організації, які займаються якістю атмосферного повітря. Зрозуміло, що дрібні частинки порівняно з іншими класами розміру мають зовсім інші фізико-хімічні властивості, такі як надвисока здатність до хімічних реакцій, висока концентрація та високе співвідношення площі поверхні до маси. Однак дані щодо складу та просторово-часового розподілу аерозолію обмежені, що ускладнює вивчення їх впливу на здоров'я. Існує великий інтерес до розробки нових методів моніторингу. Ключові параметри включають чутливість, діапазон, роздільну здатність розміру та вартість. Прилади для вимірювання аерозолів можна згрупувати за методами зіткнення, оптичними, дифузійними,

гравіметричними та методами електричної рухливості. Іноді прийоми комбінують [24].

Для моніторингу аерозолів використовуються різні наземні прилади, такі як спектрорадіометри, багатоканальні радіометри та широкосмугові радіометри [38]. Спектрорадіометри, які існують сьогодні, забезпечують чудові спектральні характеристики в повному діапазоні спектру сонячного випромінювання. Наземні багатохвильові сонячнофотометричні вимірювання є найточнішим джерелом даних аерозольної оптичної товщі (АОТ). У багатоканальних і широкосмугових радіометрах інтегральні величини довжини хвилі відтворюються так само точно, як і в спектрорадіометрах.

Сонячний фотометр здатний вимірювати АОТ і пряме сонячне випромінювання в різних діапазонах довжин хвиль, як правило, у 6 вузьких спектральних діапазонах від 360 до 1000 нм. Він використовує метод Ленглі для визначення оптичної товщини атмосфери шляхом вимірювання прямого сонячного випромінювання. Потрібна поправка на релєївське розсіювання, а також на окремі атмосферні гази, такі як озон, водяна пара тощо. Після віднімання оптичної товщини за Релеєм і оптичної товщини озону отримують оптичну товщину аерозолію.

Сонячний фотометр MICROTOP II (модель 540) – це п'ятиканальний портативний ручний сонячний фотометр. Цей прилад може вимірювати АОТ разом із згальним вмістом озону та вмістом водяної пари. Прилад оснащений п'ятьма точно налаштованими оптичними коліматорами з повним полем зору $2,5^\circ$. Повна ширина на половині максимуму спектру на кожному з каналів АОТ становить $2,4 \pm 0,4$ нм. Це радіометр типу Вольца, який вимірює інтенсивність прямого сонячного випромінювання в п'яти вузькосмугових спектральних каналах з центром на 440, 500, 675, 870 і 936 нм. Коли зображення сонця знаходиться в центрі зіниці сонячної мішені, усі оптичні канали орієнтовані безпосередньо на сонячний диск. Випромінювання зібране коліматором і смуговими фільтрами, випромінюється на фотодіоди, виробляючи електричний струм, пропорційний потужності випромінювання, яку перехоплюють

фотодіоди. Ці сигнали спочатку посилюються, а потім перетворюються на цифровий сигнал аналого-цифровим перетворювачем високої роздільної здатності. Сигнали від фотодіодів обробляються послідовно. Однак при 20 перетвореннях на секунду результати можна розглядати так, ніби фотодіоди зчитувалися одночасно. АОТ і загальний вміст водяної пари у стовпі атмосфери визначаються таким чином, щоб підтвердити закон Бугера-Ламберта-Бера.

Сонячний фотометр CIMEL (CE318) також є багатоканальним автоматичним скануючим радіометром сонця та неба, який вимірює пряме сонячне випромінювання та освітленість неба на поверхні Землі. CIMEL працює за принципом релеєвського розсіювання та вимірює загальне аерозольне навантаження в атмосфері. AERONET (Aerosol RObotic NETwork) – оптична наземна мережа моніторингу аерозолів та архів даних, що отримується із сонячних фотометрів. Ця мережа забезпечує глобальні спостереження майже в режимі реального часу за АОТ, розподілом розміру частинок аерозолу та кількістю водяної пари. Вимірювання за допомогою CIMEL виконуються на заздалегідь визначених дискретних довжинах хвиль у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах (тобто на 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 нм) – частинах спектру для визначення властивостей атмосферного пропускання та розсіювання. Сонячний фотометр CIMEL проводить вимірювання прямого сонячного освітлення та дифузного випромінювання неба з кутом повного поля зору $1,2^\circ$ у спектральному діапазоні 340–1020 нм.

Значного поширення набувають використання методів супутникового дистанційного зондування [29]. Висока просторова та часова роздільна здатність даних супутникового дистанційного зондування є більш цінною для більшості атмосферних досліджень. Застосування цих нових технологій до різних супутникових даних призвело до створення кількох аерозольних продуктів, таких як співвідношення дрібної та крупної фракцій, вертикальний розподіл, поглинання світла та деякі спектральні характеристики. Вони можуть бути використані для визначення джерел основних викидів аерозолів,

транспортування аерозолів, взаємодії між аерозолями та енергетичними і водними циклами, а також залучення аерозолів до динамічної системи.

Сучасні супутники, що обертаються навколо Землі, знаходяться на геостаціонарних або полярних орбітах. Геостаціонарні супутники обертаються навколо Землі в екваторіальній площині на відстані близько 36 000 км над поверхнею. Швидкість обертання супутника ідентична швидкості обертання Землі, і це дає змогу відстежувати динамічні метеорологічні явища, такі як великі хмари пилу, виверження вулканів, стовпи диму або регіональні події забруднення, що відбуваються протягом дня. Полярно-орбітальні супутники обертаються навколо Землі в площині, яка проходить через два полюси. Орбіта налаштована приблизно на 100 км над поверхнею Землі, що відповідає повному оберту кожні 90 хвилин. Через низьку орбіту кожне послідовне обертання досліджує лише смугу земної поверхні шириною не більше 3000 км. Кожна смуга збільшується таким чином, щоб полярна орбіта була синхронною з сонцем, тобто датчик завжди спостерігатиме сонячну сторону Землі в той самий місцевий час доби. Але це обмежує супутник лише одним спостереженням на день над будь-якою точкою поверхні Землі. Низька орбіта дозволяє датчикам мати вищу просторову роздільну здатність і точність геолокації. Більшість кількісних наборів аерозольних даних і кліматології отримано з полярних орбітальних супутників, на яких встановлено різноманітні датчики. Існує два основних режими спостереження для супутникових приладів залежно від геометрії, тобто вертикальний і горизонтальний режими спостереження. Горизонтальні спостереження характеризуються висотою та геопозицією точки дотику.

Існує велика кількість різноманітних супутникових приладів, які вимірюють параметри аерозолів в атмосфері. Серед найбільш використовуваних є супутникові прилади Ozone Monitoring Instrument (OMI), The Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), та інші.

Прилад OMI на борту супутника NASA Aura має високу спектральну роздільну здатність в УФ та видимому (270–500 нм) діапазонах спектру,

призначений для моніторингу озону та інших атмосферних складових, включаючи аерозолі. Цей прилад має можливість класифікувати типи аерозолів, а також вимірювати параметри хмарного покриву. Смуга охоплення приладом ОМІ складає 115° . Нахил орбіти супутника Aura Satellite становить $98,1$ градуса, що забезпечує широтне покриття від 82° пн.ш. до 82° пд.ш.

Супутниковий прилад MISR на борту супутника NASA Terra розроблений для вимірювання інтенсивності відбитого та поглиненого сонячного випромінювання Землею в різних напрямках і спектральних діапазонах. Він має дев'ять різних цифрових камер, кожна з яких має чотири діапазони спектру (синій, зелений, червоний, близький до інфрачервоного діапазону), і зондує поверхню Землі під дев'ятьма різними кутами. Прилад MISR може вимірювати кількість і тип аерозольних частинок, що надходять від природних та антропогенних джерел викидів. Він також може вимірювати тип і висоту хмар, а також розрізнити різні типи підстильної поверхні.

Прилад MODIS є ключовим інструментом супутників Terra і Aqua. Супутник Terra обертається навколо Землі вранці о 10:30 за місцевим часом у напрямку з півночі на південь, а Aqua обертається вдень о 13:30 за місцевим часом у напрямку з півдня на північ. Обидва ці інструменти фіксують одну і ту ж область поверхні Землі з різницею у приблизно 3 години. Вони повністю покривають поверхню Землі кожні 1–2 дні. MODIS вимірює різні оптичні властивості аерозолів, наприклад, AOT, типи аерозолів, розподіл аерозолів за розміром, що дозволяє нам зрозуміти складні атмосферні процеси та змінну динаміку клімату на суші та в океанах. Прилад MODIS забезпечує тривале та безперервне вимірювання різних властивостей аерозолію протягом дуже тривалого часу. Цей датчик відіграє важливу роль у перевірці та розробці нових моделей прогнозування зміни клімату. З 36 спектральних діапазонів перші 19 використовуються для наземних, хмарних, аерозольних параметрів, а також для кольору океану, атмосферної водяної пари, біогеохімії тощо, а решта використовуються для параметрів підстильної поверхні, хмар, атмосфери (температура, висота), а також вмісту водяної пари, тощо. Перевагами всіх цих

супутникових датчиків є широке просторове та часове покриття. Недоліком є можливість лише одного або двох вилучень на день [45].

До базових показників супутникового дистанційного зондування відносяться: АОТ та експонента Ангстрема. АОТ є кількісною оцінкою вмісту аерозолію в атмосфері і може використовуватися як вхідний параметр для обчислення часток $PM_{2.5}$. АОТ вимірює послаблення сонячного випромінювання під час проходження через атмосферу. Ступінь послаблення зростає зі збільшенням значень АОТ. Експонента Ангстрема – це параметр, який описує, як оптична товщина аерозолію зазвичай залежить від довжини хвилі світла. Експонента Ангстрема зворотно пропорційна середньому розміру аерозольних часток: чим менші частки, тим більша експонента. Вона часто використовується як якісний показник розміру аерозолів, де значення більше 2 вказує на дрібні частки, пов'язані з продуктами згорання, а значення менше 1 вказує на великі частки, такі як морська сіль та пил. На основі даних АОТ та експоненти Ангстрема оцінюються інші аерозольні параметри.

1.2 Сучасний стан досліджень аерозолію в атмосферному повітрі

На сучасному етапі розвиток супутникового зондування значною мірою акцентується на дослідженні аерозольних часток у вільній атмосфері. Важливість цього напрямку визнається в контексті його впливу на кліматичні та екологічні процеси нашої планети [36]. Існує велика кількість дослідницьких програм, які зараз покладаються на дані із супутників. Спостереження за атмосферою використовуються для прогнозування погоди, моніторингу забруднення навколишнього середовища, зміни клімату тощо. Дистанційне зондування землі використовується в моніторингу мінеральних ресурсів, повеней, вологості ґрунту, рослинності, вирубки лісів, лісових пожеж, сільськогосподарському моніторингу та іншим галузям [22]. Супутникове дистанційне зондування також відіграє важливу роль у соціальних наукових дослідженнях глобальних криз, таких як пандемія COVID-19 [43].

Розробка супутникових датчиків на початкових етапах була орієнтована на визначені цілі. Запуск приладів, таких як Landsat і Advanced Very High Resolution Radiometer, у 1970-х роках був спрямований на моніторинг земної поверхні та атмосфери. Проте, з часом, розвиток технологій та збільшення обсягу даних створили можливість для більш розширених та точних приладів. Сучасні місії, такі як MOPITT, OCO і GOSAT, спрямовані на вдосконалене вимірювання парникових газів, підкреслюють постійний технологічний прогрес у цій галузі. Активні та пасивні супутникові зображення, такі як MODIS і CloudSat, використовуються для комплексного моніторингу атмосфери, суші та океану. Незважаючи на великі можливості сучасних супутникових спостережень, наявні дані ще не відповідають повністю вимогам багатьох програм. Тому важливим є впровадження нових датчиків із розширеними можливостями. Зокрема, поляриметричні дані визнані як найбільш відповідні для деталізованого аналізу атмосферного аерозолі та хмар. Прогнозується, що у наступному десятилітті значна увага буде приділена поляриметричним даним, зокрема завдяки запуску передових місій, таких як Multi-View/ Multi-Channel/ Multi-Polarization Imaging missions та інші. Збільшення кількості супутникових лідарів і радарів також відіграє важливу роль, оскільки ці активні інструменти надають детальну інформацію про вертикальну мінливість атмосфери [22].

Проблема відновлення властивостей атмосферних аерозолів часто полягає в розділенні світла, розсіяного частинками аерозолі, від світла, розсіяного хмарами, атмосферними газами та поверхнею землі. Супутникові датчики, такі як MODIS (радіометр) або POLDER (поляриметр), які спрямовані на моніторинг аерозолів, можуть не мати оптимальних можливостей для видалення ефектів хмар, газів та поверхневого забруднення. Синергія даних від різних інструментів може вирішити цю проблему. Наприклад, багатокутові поляриметричні спостереження MAP/CO₂M та DPC, заплановані в рамках місій CO₂M EU/Coernicus і GF-5 у Китаї, передбачають надання інформації для атмосферної корекції та моніторингу парникових газів [28,23]. Такі спостереження можуть покращити характеристику газів у ситуаціях з помірним і, можливо, високим

вмістом аерозолів. Місія NASA PACE також планує використання поляриметричних інструментів SPEX і HARP разом із гіперспектральним випромінюванням з ОСІ для точніших вимірювань аерозолів, корисних для отримання даних про властивості поверхні. Наприклад, для густонаселених міст, де ландшафти та властивості підстильної поверхні є дуже неоднорідними, важливо мати високочастотні та високороздільні дані щодо якості повітря. Запуск менших, ефективних і вартісних супутників, таких як нано- або кубічні супутники, може покращити охоплення завдяки збільшенню кількості орбітальних інструментів [22].

Застосування методів машинного навчання в обробці супутникових даних стає все більш популярним. Це відкриває нові можливості для вдосконалення прогнозів та моделювання фізичних явищ [40]. Важливо забезпечити неперервність спостережень аерозолів на протязі тривалого періоду часу. Це вимагає належного технічного обслуговування супутників, а також участі в міжнародних програмах, таких як CLARREO, що мають на меті забезпечити стабільність та надійність довгострокових рядів даних [22].

Значна увага науковців зосереджена на дослідженні аерозолів різного хімічного складу та походження. Зокрема, досліджуються наслідки надходження аерозолію від виверження вулканів [34], та їх подальшого охолоджуючого ефекту. Сульфатні аерозолі, які утворюються в результаті виверження, блокують сонячне світло та призводять до охолодження атмосфери. Прикладом може бути велике виверження гори Пінатубо у 1991 році, яке призвело до охолодження атмосфери на 0.4-0.5 °C і зробило 1992 та 1993 роки найхолоднішими за останні 35 років [21]. Різноманітні аерозольні ефекти внаслідок згоряння кам'яного вугілля, нафти та інших вуглеводневих ресурсів виділяє сульфатні частки та діоксид сірки [42]. Частина з них, подібно вулканічним аерозолям, відбивають сонячне випромінювання. Однак ці аерозолі не утримуються в атмосфері довго – від 3 до 5 днів.

Важливим напрямком досліджень залишається вплив аерозолію на здоров'я населення [20]. Наприклад, забруднене викопним паливом повітря щорічно

призводить до передчасної смерті близько 8 мільйонів людей по всьому світу, а дрібні частинки можуть викликати різноманітні захворювання, включаючи астму, респіраторні інфекції, рак легенів і серцеві захворювання [37].

В Україні дослідження аерозолів в атмосферному повітрі проводять кілька наукових груп, серед яких вчені кафедри метеорології та кліматології географічного факультету (Сніжко С., Шевченко О. та ін.), а також фізичного факультету (Міліневський Г., Грицай А., та ін.) Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України (Савенець М., Дворецька І., та ін.), Головної астрономічної обсерваторії (Данилевський В., Синявський І., та ін.) Інституту громадського здоров'я ім. Марзеєва НАМН України (Турос О., Петросян А. та ін.).

Розроблено та впроваджено розширену мережу моніторингу аерозолів з використанням системи AirVisual. Однією з їхніх спільних робіт було дослідження "Розширена мережа моніторингу аерозолів AirVisual у місті Києві" [6]. У цьому проекті увагу зосереджено на контролі за станом приземного повітря в Києві, особливу увагу приділяючи показникам $PM_{2.5}$. Робота включала вивчення інтенсивного забруднення твердими частинками під час лісових пожеж у північній частині України, зокрема в Чорнобильській зоні відчуження, у березні–квітні 2020 року.

Шевченко О. та Сніжко С. здійснювали важливі дослідження щодо класифікації міст України за рівнем забруднення атмосферного повітря [18], а також досліджували забруднення атмосфери урбанізованих територій [13]. Зокрема, оцінено вплив метеорологічних чинників на концентрацію шкідливих домішок у повітрі. Запропоновано та апробовано методику короткострокового прогнозування забруднення атмосферного повітря на основі спектрального аналізу часових рядів. А також було здійснення класифікації міст за рівнем перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК).

Міліневський Г.П. виконував роль керівника проекту CRDF США "Дослідження атмосферного аерозолів над Україною методами наземних

вимірювань у поєднанні із супутниковими даними" (2010-2012 рр.). Разом з Данилевським В.О. приймав участь у розробленні комплексу наукової апаратури космічного експерименту "Аерозоль-UA" [12], та виконував обов'язки координатора програми в Україні проекту підготовки цієї місії. Основною метою експерименту було отримання даних щодо фізичних характеристик аерозолів, а також їх просторового та часового розподілу в атмосфері Землі. Міліневський Г.П. та Данилевський В.О. були активними учасниками дослідження властивостей аерозолів в атмосфері над Києвом з використанням лідарних та фотометричних спостережень [1], що включало в себе аналіз оптичних та мікрофізичних параметрів аерозольних частинок та їхнього просторового розподілу. Спостереження проводились за допомогою лідара CIMEL370 та сонячного фотометра станції Київ мережі AERONET.

Петросян А.А., Маремуха Т.П. та Турос О.І. відомі своїми вагомими дослідженнями в галузі оцінки впливу забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення. В роботі "Оцінка впливу забруднення атмосферного повітря $PM_{2.5}$ на здоров'я населення Києва" [17] вони провели 24,826 вимірювань концентрації $PM_{2.5}$ на стаціонарному посту спостереження у Києві. Для аналізу були використані статистичні показники неінфекційної захворюваності серед дорослого населення міста. Було проведено розрахунок атрибутивної частки ризику смерті та кількості атрибутивних випадків смерті, який проводився за допомогою програмного комплексу AirQ+. Інші дослідження були спрямовані на забруднення атмосферного повітря зваженими частками пилу у Деснянському районі м. Києва [16], удосконалення та організація автоматизованої системи моніторингу якості атмосферного повітря в Україні [10], і вплив аероалергенів пилку на формування бронхіальної астми у дітей м. Києва [15].

Надточій Л., Савенець М., Кіптенко Є., Козленко Т. проводили дослідження, спрямовані на вивчення забруднення атмосферного повітря в Україні. Їхні роботи включають аналіз міжрічної мінливості рівня забруднюючих речовин у промислових містах [9], оцінки моделі Enviro-NIRLAM щодо забруднення сажею внаслідок лісових пожеж [39], особливості

динаміки забруднення атмосферного повітря пилом у містах [8], дослідження системи моніторингу забруднення атмосферного повітря в місті Києві та напрямки її удосконалення [3].

1.3 Висновки до Розділу 1

Аналіз сучасної літератури показав значну роль аерозолів у формуванні забруднення атмосферного повітря, впливу на клімат та здоров'я населення. Розробляються нові методи вимірювання концентрацій аерозолію в атмосферному повітрі, та відновлення вмісту на основі супутникового зондування. В останні роки значно покращилося уявлення про хімічну взаємодію аерозолів, утворення вторинних аерозолів із газових складових атмосферного повітря, та розуміння взаємодії із сонячним випромінюванням та водяною парою, що визначають прямі та непрямі аерозольні ефекти. Почалося активне використання методів машинного навчання, які дозволяють переходити від вмісту у вертикальному стовпі атмосфери до концентрацій аерозолію у приземному шарі, що вкрай важливо для оцінки впливу на здоров'я населення.

В Україні аерозолі активно досліджуються різними науковими групами в університетах та наукових установах. Ці дослідження охоплюють широкий спектр питань: від наукового розуміння зміни аерозолію в атмосфері та його негативного впливу, до сучасних технічних розробок наукової апаратури для дистанційного зондування.

Незважаючи на активні дослідження аерозолію українськими науковцями, зміна його постійної емісії потребує продовження неперервних досліджень, включаючи актуалізацію ролі аерозолію для здоров'я населення та природних екосистем України. Одним із нових джерел аерозольного забруднення стала осушена територія Каховського водосховища після підриву греблі Каховської ГЕС, мова про яку піде нижче. Як нова ділянка із потенційним погіршенням стану якості атмосферного повітря, ця територія потребує дослідження зміни вмісту аерозолію.

РОЗДІЛ 2. ПЕРВИННІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ АЕРОЗОЛЮ НАД КАХОВСЬКИМ ВОДОСХОВИЩЕМ

2.1 Підрив греблі Каховського водосховища та наслідки для навколишнього середовища

Підрив греблі на Каховській ГЕС здійснено з боку російських окупантів в ніч на 6 червня 2023 р., що стало однією з наймасштабніших техногенних катастроф на території України. Наслідки підриву досі важко оцінити, але вже зараз спостерігається серйозний вплив на екологічний стан територій нижче за течією р. Дніпро, та погіршення гуманітарної ситуації для населення.

Руйнування греблі Каховської гідроелектростанції призвело до раптового виливу води з водосховища. Великий обсяг води затопив значні території на Херсонщині у близько 80 населених пунктів, включаючи місто Херсон. Не вдалося уникнути жертв як на окупованій, так і на підконтрольній частині Херсонської області. На сьогодні, очікується загроза дефіциту питної води у південних областях, включаючи Крим, що посилює наслідки ситуації, що склалася у регіоні. В Укргідроенерго підтвердили, що після підриву греблі станція зазнала повної руйнації машинної зали, що ускладнило можливість відновлення роботи ГЕС [2].

Подібна техногенна катастрофа створює серйозні екологічні проблеми. Завдано шкоди рослинному світу, водним екосистемам та різноманіттю тваринного світу. Негативний вплив здійснено на ґрунтові ресурси та водні маси, що у майбутньому може призвести до довгострокових змін у природних екосистемах, включаючи загрозу для біорізноманіття. Варто зазначити, що затоплення спричинило втрати врожаю овочевих культур, і призвело до затоплення зоопарку «Казкова діброва» в окупованій Новій Каховці, що є серйозною втратою у природоохоронній сфері [4].

Науковці Національної академії наук України у ході досліджень після руйнування греблі Каховської ГЕС зазначили, що внаслідок цієї катастрофи

сталася непоправна шкода для екосистеми регіону та природних водних ресурсів [7]. Наразі активним дослідженням наслідків займаються науково-дослідні установи НАН, у тому числі Інститут гідробіології, Український гідрометеорологічний інститут, Інститут ботаніки, тощо.

У Постанові №313 НАН України стверджується, що руйнування греблі стало причиною серйозного екоциду, в результаті чого було знищено молодь риб та загинули популяції понад 70 видів риб, у тому числі 18 червонокнижних видів. Крім того, дослідження науковців виявило фрагментацію Каховського водосховища на багато водойм, що призвело до втрати прямого зв'язку із Дніпром та створило загрозу для водоносних горизонтів [11].

Крім екологічних наслідків, катастрофа має потенційно серйозні економічні наслідки через затоплення об'єктів інфраструктури (дороги, будівлі, іригаційні системи, тощо). Вже зараз економічні втрати оцінюються у кілька мільярдів гривень, а відновлення інфраструктури та відшкодування для постраждалих потребуватимуть значних зусиль та ресурсів. Додатковою загрозою, що виникає після підриву греблі, є потенційна небезпека для безпеки ядерних об'єктів, зокрема Запорізької атомної електростанції. Підрив греблі Каховського водосховища створює ризик для охолодження реакторів, що може призвести до серйозних наслідків у ядерній сфері [31]. Негайні заходи відновлення екологічної стійкості, надання допомоги та координація міжнародних зусиль для усунення наслідків цієї трагедії стали невідкладним завданням для всього світу.

Руйнування Каховської греблі призвело до серйозних гуманітарних наслідків. Десятки тисяч осіб були евакуйовані зі своїх домівок і залишилися без житла, майна та необхідних ресурсів для виживання. Це спричинило значні втрати у забезпеченні життєво важливих потреб людей, включаючи доступ до питної води та інфраструктури [14].

Очевидно, що наразі найбільшу увагу приділяють вище згаданим проблемам через їх масштабність та значні втрати. У той же час, осушена територія Каховського водосховища стає новим джерелом викидів аерозолію в

атмосферне повітря, шляхом підняття мінерального пилу вітром, що може впливати на якість атмосферного повітря прилеглих міст. З точки зору метеорологічних досліджень, ми почали спостерігати нову динаміку джерела забруднення, що потребує додаткової уваги. Саме це і стало аргументом вибору теми даного дослідження, результати якого представлені у розділах 2-3.

2.2 Вхідна супутникова інформація

Дослідження, представлені у роботі, виконані на відносно короткому періоді спостережень з метою дослідження еволюції аерозольного вмісту над осушеною територією Каховського водосховища. Після підриву греблі, досліджувана територія характеризувалася швидкою зміною підстильної поверхні, а тому правильне проведення розрахунків потребує розбиття загального періоду досліджень на окремі періоди, що певною мірою описують стан водосховища у той чи інший час з подібними ознаками підстильної поверхні.

Досліджуваний період був поділений на 6 основних проміжків часу. Цей часовий поділ здійснено на основі результатів неперервного щоденного моніторингу стану Каховського водосховища в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України за аерозольним індексом та типами підстильної поверхні. Тому, за основу було взято періоди, виділені за певними ознаками зміни параметрів. Частина із них описана у даній роботі у розділі 3.1

Загальний період досліджень охоплює з 1 травня 2023 р. до 8 листопада 2023 р. Початок періоду обрано таким чином, щоб оцінити актуальний стан аерозольних складових напередодні підриву греблі і мати достатню кількість спостережень для аналізу (тобто близько 1 місяця). Кінець досліджуваного періоду обрано після кількох тижнів відсутності швидких змін типів підстильної поверхні. Загальний період досліджень поділений на наступні інтервали:

- 1 травня – 5 червня 2023 р. – період до підриву греблі;

- 7 червня – 4 липня 2023 р. – співмірний за кількістю днів період після підриву греблі, коли територія Каховського водосховища зазнавала активного осушення і значним чином змінювався стан підстильної поверхні. В межах цього інтервалу окремо виділяли період до 20 червня 2023 р., коли не спостерігалися зміни аерозольного вмісту в атмосфері;
- липень 2023 р. – період після осушення зі значним покриттям території піщаними поверхнями;
- серпень 2023 р. – період з характерною появою рослинності на дні осушеного Каховського водосховища;
- вересень 2023 р. – період, подібний за ознаками підстильної поверхні до серпня, проте з відмінними метеорологічними умовами формування аерозольного вмісту в атмосфері;
- жовтень – 8 листопада 2023 р. – період зі стабілізацією стану осушеної поверхні Каховського водосховища.

Варто зазначити, що для оцінки стану підстильної поверхні у розділі 3.1, досліджувані періоди дещо варіювалися, так як існувала потреба комбінування знімків за іншим супутником (Landsat) та уникати негативного впливу хмарності. Проте, це не впливає на проведення розрахунків, так як дані Landsat використовувалися тільки для візуального аналізу типового стану підстильної поверхні без залучення до обчислень аерозольних параметрів.

З метою проведення оцінки зміни підстильної поверхні в районі Каховського водосховища та аналізу місць розташування основних піщаних масивів, використано дані супутника LandSat, отриманих та оброблених із використанням платформи Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>) [25]. Серед наявних супутникових продуктів використано USGS Landsat 9, рівень обробки 2 (Level 2), колекція 2 (Collection 2, Tier 1), який позначається скороченою назвою “LANDSAT_LC09_C02_T1_L2”.

Цей набір даних містить атмосферно скоригований коефіцієнт відбиття поверхні та температуру поверхні землі, отримані з даних, отриманих датчиками

Landsat 9 OLI/TIRS. Ці зображення містять 5 видимих і ближніх інфрачервоних (VNIR) смуг і 2 короткохвильових інфрачервоних (SWIR) смуги, оброблені для орто-випрямленої поверхневої відбиття, і одну теплову інфрачервону (TIR) смугу, оброблену для орто-випрямленої температури поверхні. Вони також містять проміжні смуги, які використовуються для розрахунку продуктів ST, а також смуги QA. Смуги зібраних даних упаковуються в т.з. "сцени", що перекриваються, охоплюючи приблизно 170 км x 183 км, використовуючи стандартизовану еталонну сітку.

Супутникові знімки генерувалися та оброблялися на основі скриптів, написаних на мові Javascript. Приклад коду для обробки знімків певної частини досліджуваного періоду та території Каховського водосховища наведено нижче:

```
var dataset = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC09/C02/T1_L2')
    .filterDate('2023-05-15', '2023-06-04');
// Applies scaling factors.
function applyScaleFactors(image) {
    var opticalBands = image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2);
    var thermalBands = image.select('ST_B.*').multiply(0.00341802).add(149.0);
    return image.addBands(opticalBands, null, true)
        .addBands(thermalBands, null, true);}
dataset = dataset.map(applyScaleFactors);
var visualization = {
    bands: ['SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2'],
    min: 0.0,
    max: 0.3,};
Map.setCenter(30.0, 48.0, 8);
Map.addLayer(dataset, visualization, 'True Color (432)');
```

Періоди, для яких здійснювалося комбінування знімків підібрано для відображення поступових змін стану підстильної поверхні, при цьому у дні без покриття території суцільною хмарністю. Комбіновані знімки підстильної поверхні, побудовані у Google Earth Engine, охоплюють наступні періоди:

- 15.05-03.06.2023 - для отримання зображення стану Каховського водосховища перед підривом греблі;
- 06.06-20.06.2023 - для отримання зображення стану Каховського водосховища в перші 14 днів після підриву греблі;
- 21.06-04.07.2023 - для отримання зображення стану території колишнього водосховища
- 01.07-31.07.2023 - для отримання зображення стану території після осушення водосховища
- 01.08 - 31.08.2023 - для отримання зображення змін стану території за серпень
- 01.09 - 30.09.2023 - для отримання зображення відновлення території після підриву греблі.

Дослідження аерозольних параметрів проведено із використанням даних супутникового приладу MODIS супутника Terra EOS AM-1. Детальніший опис супутникового приладу MODIS наведено у підрозділі 1.1.2 цієї роботи.

Для дослідження обрано супутникові продукти другого рівня архівації даних (Level 2). Аерозольні параметри на цьому рівні отримуються із просторовою роздільною здатністю 1 км. Дані було завантажено із системи NASA's Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov/search/>) [33].

Серед наявних аерозольних параметрів обрано три, на основі яких можна максимально детально оцінити вміст аерозолію в атмосфері та розмір часток: аерозольна оптична товща (AOT), експонента Ангстрема і масова частка аерозолію у вертикальному стовпі атмосферного повітря. Детальний опис AOT та експоненти Ангстрема наведено у підрозділі 1.1.2.

У обраних супутникових даних параметр AOT представлено у вигляді двох окремих наборів даних: безпосередньо виміряний AOT та додатково скориговані значення, які називаються "corrected optical depth" (COD). У роботі використано саме скориговані дані AOT задля отримання більш точних даних. AOT є

безрозмірним показником та характеризує загальний вміст аерозолі у вертикальному стовпі атмосферного повітря.

Експонента Ангстрема є похідним параметром від АОТ, що обчислюється на основі логарифмічної залежності даних поглинання на різних довжинах хвиль. Експонента Ангстрема представлена у супутникових наборах даних. Це також безрозмірний показник з діапазоном розкиду значень від 0 до 2. Значення 0 відповідає великодисперсним часткам у повітрі (напр., сажа, пил, тощо), тоді як значення 2 – дрібнодисперсному аерозолі (напр., сульфатний). Таким чином, під час аналізу надходження аерозолів з осушених ділянок Каховського водосховища очікуємо зменшення показника експоненти Ангстрема, що відповідатиме зростанню надходження пилу в атмосферу.

Масова частка аерозолі у стовпі атмосферного повітря (далі по тексту МЧА) входить до переліку у наборах даних MODIS, хоча цей показник, найчастіше, не є базовим для супутникового зондування. Його розраховують у цетрах прийняття супутникової інформації. МЧА вказує на вміст аерозолі у вертикальному стовпі атмосфери, приведений до її верхньої межі (площею cm^2). Одиницями вимірювання МЧА є 10^{-6} г/см^2 .

2.3 Методика обробки супутникової інформації та статистичних обчислень.

Дані супутника MODIS представлені у форматах HDF4. Завантажувалися щоденні дані над територією, яка покриває Каховське водосховище та південь України. Кожен окремий HDF4 файл із даними містить кілька мільйонів пікселів інформації. Тому, для роботи із АОТ, експонентою Ангстрема і МЧА увесь процес обробки потребував автоматизації. Автоматизація здійснювалася у кілька етапів із використанням власних batch-скриптів та мови програмування Python.

Етап 1. Для зменшення часу виконання обробки та економії комп'ютерних ресурсів, одразу проведено вивантаження необхідних наборів даних: АОТ, МЧА, експонента Ангстрема, широти й довготи. Це здійснено за допомогою бібліотеки Geospatial Data Abstraction Library – GDAL

(<https://gdal.org/index.html>), зокрема утиліт `gdal_info` і `gdal_translate`. За допомогою утиліти `gdal_info` експортовано метадані, необхідні для обробки файлів із застосуванням команди:

```
gdal_info [назва файлу]
```

Отримавши метадані, необхідні дані обраних параметрів експортовано у текстові файли із використанням утиліти `gdal_translate`, реалізувавши команду:

```
gdal_translate HDF4_EOS:EOS_SWATH:"[назва супутникового файлу]":mod04:[назва параметру] [кінцевий текстовий файл]
```

Так як цю процедуру потрібно було реалізувати для 191 файлу, автоматизацію здійснено у batch-скрипті із кодом:

```
@echo off
for %%f in (*.hdf) do (
echo %%f
gdal_translate HDF_EOS:EOS_SWATH:"%%f":mod04:Corrected_Optical_Depth_Land
CorOpDep%%f.xyz
...

```

Етап 2. Після вивантаження даних, здійснено їх обробку із використанням бібліотеки `numpy` (<https://numpy.org/doc/stable/>) мови програмування Python. У той же час постала інша проблема. Супутникові дані Terra покривають територію України щодня під різними кутами, тому шлях трасера змінюється, а координати із дня у день покривають різні ділянки. Як наслідок, постає необхідність приведення даних до регулярної сітки координат та перерахунку даних у відповідні вузли сітки. Усі наведені процеси мають відбуватися паралельно при автоматизації.

Координатну сітку задано таким чином, щоб повністю покрити територію Каховського водосховища, частину території півдня України та Олешківські піски. Координати початкового вузла сітки є 32.52° сх.д., 46.34° пн.ш., кінцевого – 35.72° сх.д., 47.94° пн.ш. Крок регулярної сітки обрано 0.2° . Таким чином, на обрану територію припадає 128 вузлів сітки (рис. 2.1).

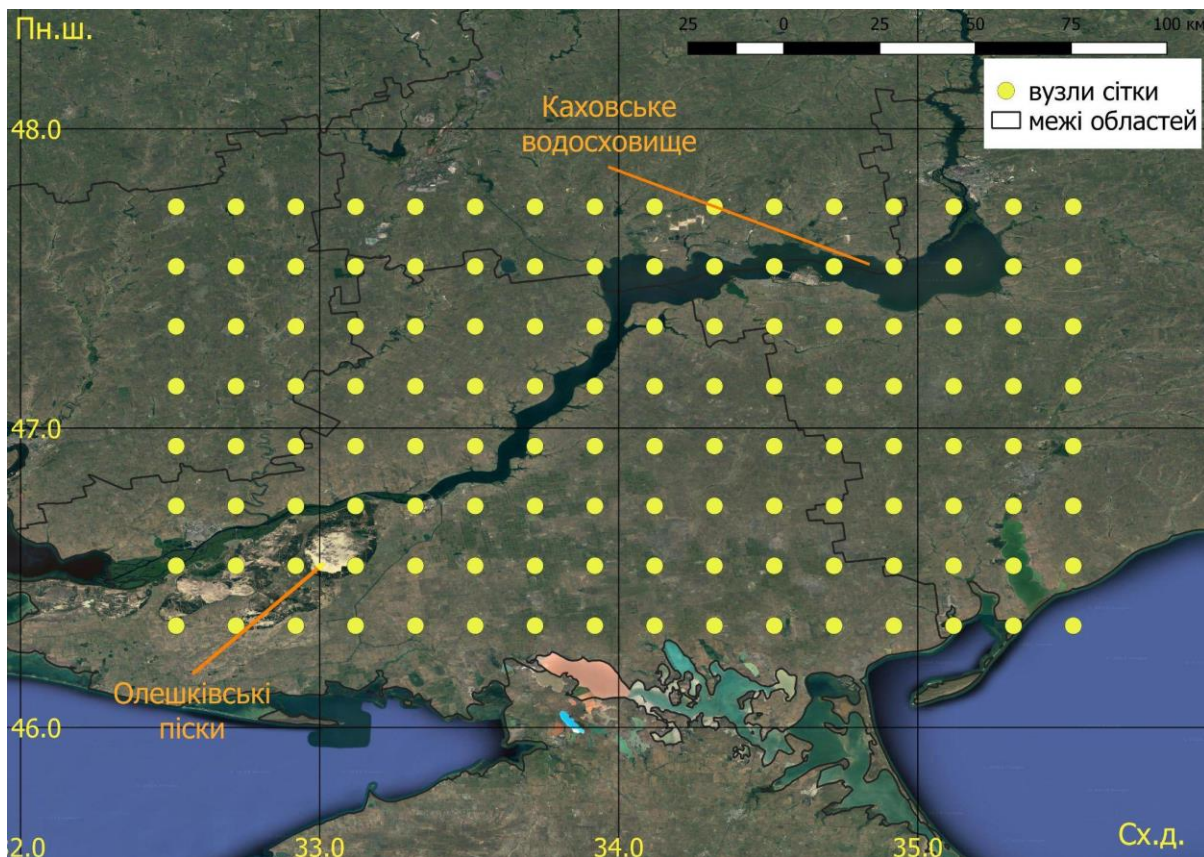


Рис. 2.1 Область досліджень із вузлами заданої регулярної сітки координат

Координати задано для нижнього лівого вузла сітки. Усі пікселі, що потрапляють у межі квадрату розміром $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ осереднено. Якщо дані були відсутні (відфільтровані чи з наявною хмарністю), осереднення не проводилося, а квадрату надавалося значення NaN – тобто пропуск.

Етап 3. Статистична обробка даних виконувалася індивідуально для кожного показника. Значення АОТ у кожному вузлі сітки спочатку осереднено (середнє арифметичне) для періодів, вказаних на початку розділу 2. Проте, через велику кількість факторів, що спостворювали об’єктивну оцінку зміни абсолютних значень показників внаслідок надходження пилу (напр., зміна синоптичних умов; хмарність; сезонність показника, що проявляється на рядах довжиною 191 день; та інші), для кожного періоду після підриву греблі обчислено зміну АОТ відносно періоду до підриву:

$$\text{відносний АОТ(\%)} = \frac{\text{АОТ періоду після} - \text{АОТ періоду до}}{\text{АОТ періоду до}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Для аналізу експоненти Ангстрема використано поділ на 4 градації від 0 до 2,0. Градація від 0 до 0,5 відповідає аерозолію із переважно великими частками. Градація від 1,5 до 2,0 відповідає дрібнодисперсному аерозолію. Дві проміжні градації – 0,5–1,0 і 1,0–1,5 – відповідають середньому розміру часток, розподілених ближче до грубо- чи дрібнодисперсних, відповідно. Для досліджуваних періодів для кожного вузла сітки здійснено розрахунок повторюваності (у %) потрапляння експоненти Ангстрема у градації. З метою аналізу зміни експоненти Ангстрема після підриву греблі Каховського водосховища, від кожного періоду (див. опис вступної частини розділу 2) віднімалося значення періоду до підриву. Таким чином, знаходилися різниці у повторюваності появи градацій із переважаючим розміром аерозольних часток.

Так як, МЧА є єдиним із параметрів, який характеризує вміст аерозолію через концентрацію (грами, приведені до верхньої межі атмосферного стовпа), дослідження МЧА здійснено на основі обчислення середніх значень МЧА за певний період. Для МЧА різниці між періодами після підриву і до не обчислювалися.

Етап 4. Останнім етапом стала візуалізація проаналізованих параметрів аерозолію. На основі обчислених відносних змін АОТ, а також середніх значень МЧА створено картосхеми із використанням відкритої геоінформаційної системи QGIS. Топографічною основою для побудови картосхем обрано стандартну Open Street Map (OSM Standard). Через дані у вузлах регулярної сітки координат проведено ізолінії із використанням інструменту “Contour”, які були згладжені за допомогою інструменту “Smooth”. Для аналізу експоненти Ангстрема використовувалися стандартні графіки Microsoft Excel.

Методологія досліджень, представлена у розділі 2, частково висвітлені автором у статті [5].

2.4 Висновки до Розділу 2

Підрив греблі Каховської ГЕС призвело до великої кількості негативних наслідків. У той же час, дослідження додаткового надходження пилу в атмосферне повітря не проводилося. Враховуючи відсутність наземних спостережень у районі осушеного Каховського водосховища, здійснено розроблення методології досліджень аерозолію на основі супутникового зондування.

За особливостями зміни підстильної поверхні, досліджуваний період розділено на окремі інтервали. Використовуючи дані Landsat, написані скрипти на мові Javascript, реалізація яких дозволила візуалізувати дані щодо зміни підстильної поверхні.

Розроблені алгоритми оброблення даних супутникового приладу MODIS з метою дослідження змін АОТ, МЧА та експоненти Ангстрема. Здійснено приведення піксельних даних вихідних файлів до регулярної сітки координат, що дозволило створити часові ряди, необхідні для дослідження зміни аерозольних параметрів.

Представлені алгоритми та скрипти разом із описом методології, дозволили провести більшу частину обробки даних у автоматичному режимі. Більш того, розроблена методологія може бути застосована до аерозольних параметрів над іншими ділянками, включаючи піщані території, зони лісових пожеж, а також при дослідженні наслідків ракетних ударів по об'єктам промисловості.

РОЗДІЛ 3. ЗМІНА АЕРОЗОЛЬНОГО ВМІСТУ ВНАСЛІДОК ОСУШЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

У цьому розділі представлено аналіз результатів дослідження зміни підстильної поверхні Каховського водосховища та основних аерозольних показників (АОТ, МЧА, екпонента Ангстрема). Перша частина розділу присвячена основним змінам підстильної поверхню протягом досліджуваного періоду. У другій частині розділу описується основні закономірності просторово-часової зміни параметрів аерозолію.

3.1 Зміни підстильної поверхні Каховського водосховища та прилеглих територій

Напередодні руйнування греблі Каховської ГЕС територія навколо водосховища не мала значних за площею піщаних територій, тобто емісія мінерального пилу не відбувалася у масштабах, які б дозволяли формувати високі концентрації (див. рис. 3.1а).

Після підриву греблі Каховського водосховища рівень води відчутно зменшився, що призвело до доступності прибережних територій, що були під водою (рис. 3.1б). Особливо помітне стрімке обміління північної частини водосховища, що призвело до його поділу на окремі водойми, через які протікає русло Дніпра. Утворення ряду малих і великих водойм, частина з яких сполучаються протоками з руслом річки (див. рис. 3.1б). На південній частині Каховського водосховища у перші два тижні після підриву майже не спостерігалось піщаних ділянок. Особливо темний колір ґрунту у південній та західній частинах вказує на високий вміст вологи у цей час і, ймовірно, мулисті ділянки.



Рис. 3.1 Супутникове зображення підстильної поверхні Каховського водосховища та прилеглих територій скомбіновані зі знімків LandSat за період 15.05.-03.06.2023 р. (а) та 06.06 – 20.06.2023 р. (б)

Вже починаючи з 20-х чисел червня, територія Каховського водосховища почала різко висихати (рис. 3.2а). Внаслідок осушення з'явилися піщані береги, які вирізняються своїм яскравим кольором через вище альbedo і є добре видимими на північно-східній ділянці (див. рис. 3.2а).

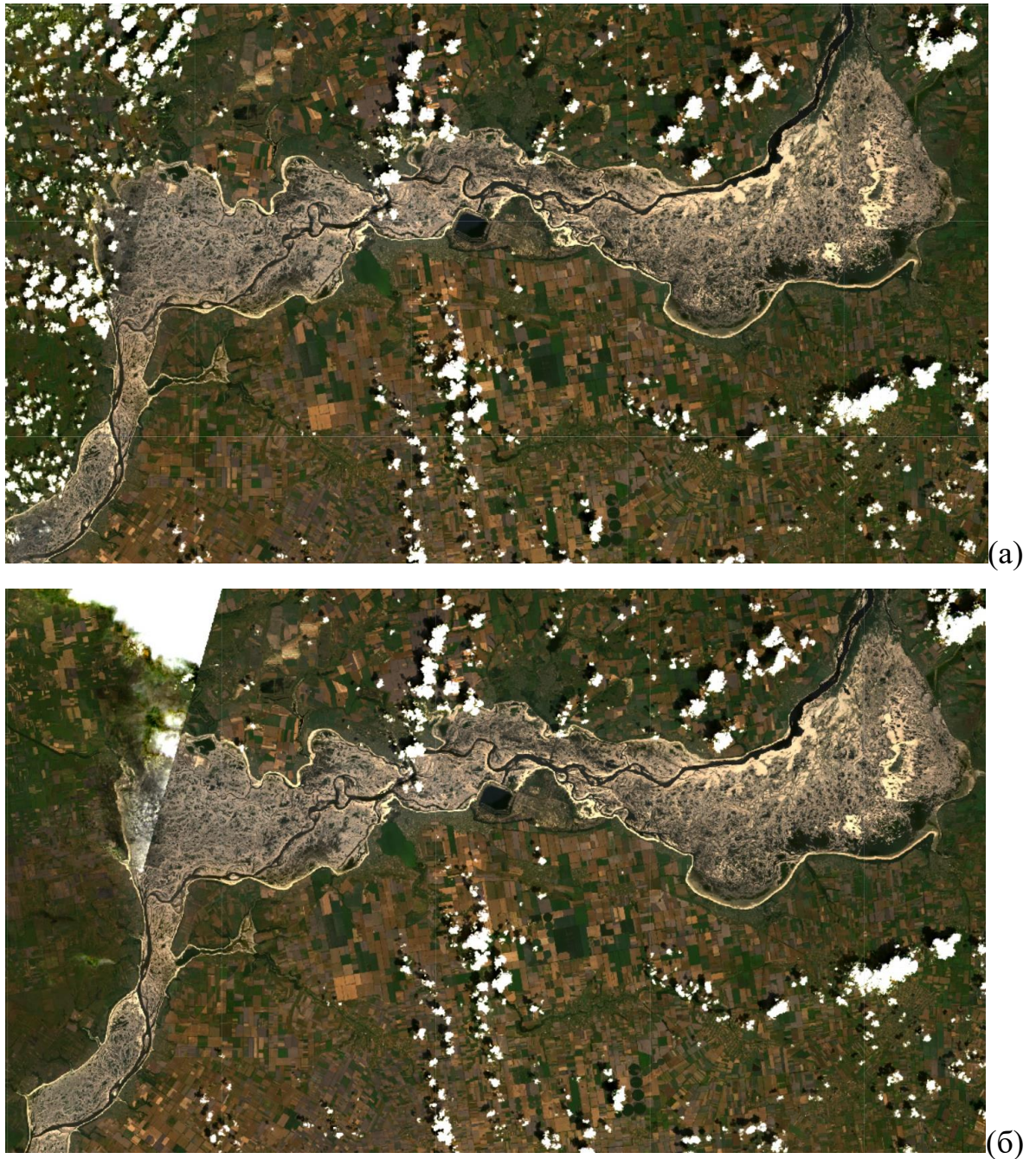


Рис. 3.2 Супутникове зображення підстильної поверхні Каховського водосховища та прилеглих територій скомбіновані зі знімків Landsat за період 21.06 – 04.07.2023р. (а) та 01.07 – 31.07.2023р. (б)

Найсуттєвіші зміни зафіксовані у північно-східній частині колишнього водосховища, що виникає завдяки особливостям геоморфологічної структури цієї території. Рельєф дна водойми у цій області відзначається відносно рівнинною формою, що призводить до швидкого висихання цих ділянок. Важко

не помітити, що значна частина поверхні водосховища має світло-коричневий колір, що вказує на наявність донних відкладів та піщаних фракцій.

Після осушення частини Каховського водосховища, територія поступово стала новим джерелом викидів аерозолі в атмосферне повітря, що надходить внаслідок підняття пилу вітром (див. рис. 3.2б).

Починаючи із серпня можна помітити що з'являється рослинність в західній, північній та, частково, південній частинах ділянки колишнього водосховища (рис. 3.3а). Таким чином, відбувається перехід від процесів осушення Каховського водосховища до початку процесів відновлення природного стану території (див. рис. 3.3а).

Рослинність на цій території починає адаптуватися до нових умов, з'являючись на піску та зміцнюючи осушену територію. З'являються проростки дерев та чагарників. Крім того, піщані відклади зберігаються в центральній та східній частині ділянки (див. рис. 3.3б).

Таким чином, піщані території на осушених ділянках Каховського водосховища почали активно з'являтися із кінця червня – початку липня 2023 р. Починаючи з цього періоду, аналіз аерозольних складових у атмосферному повітрі потребує особливої уваги. Поява чітко видимої рослинності у серпні 2023 р. може мати наслідки і для емісії мінерального пилу. Тому, цей період також потребує детального вивчення для розуміння ролі рослинного покриву у зменшенні надходження аерозолі.

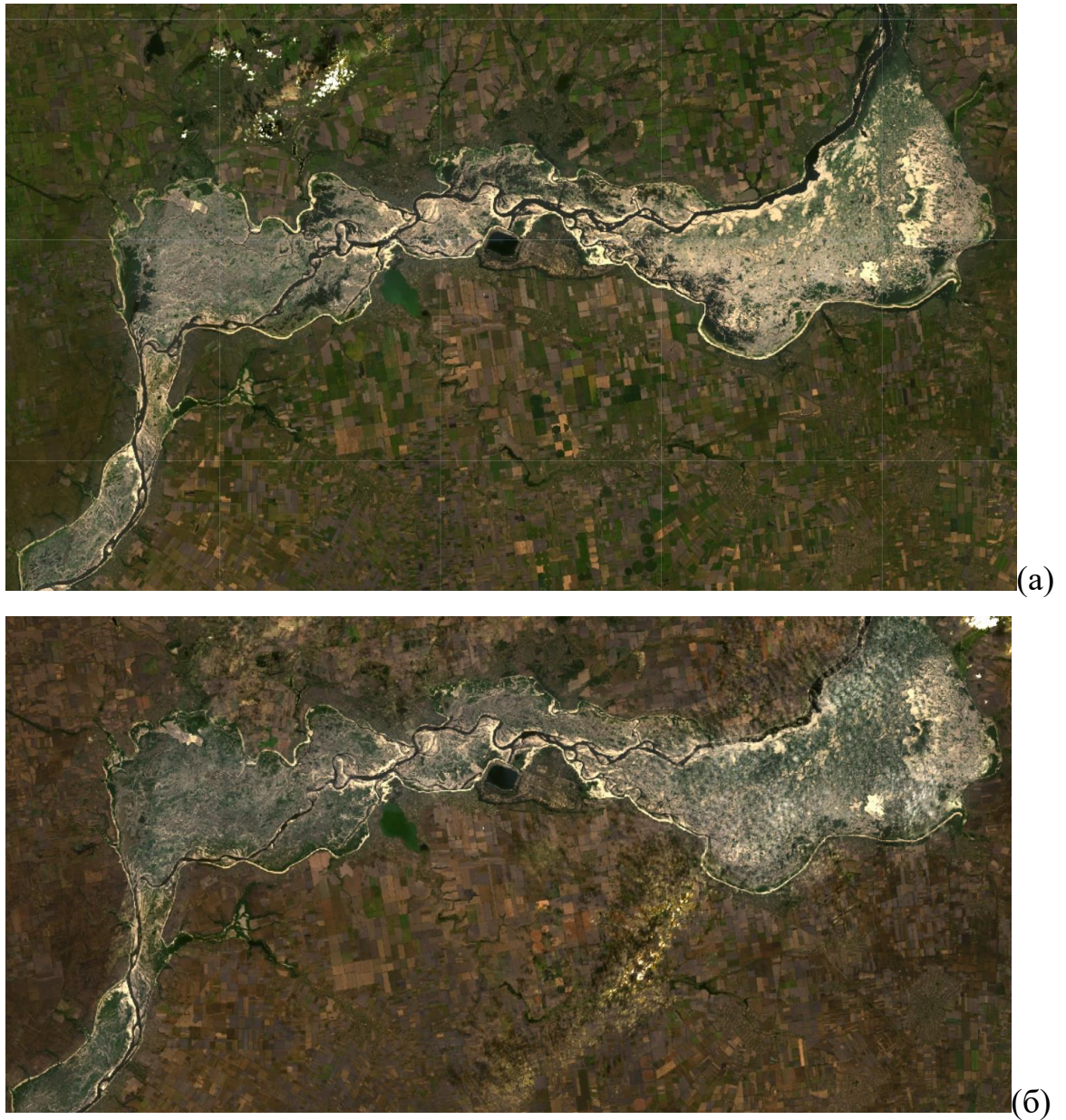


Рис. 3.3 Супутникове зображення підстильної поверхні Каховського водосховища та прилеглих територій скомбіновані зі знімків LandSat за період 01.08 – 31.08.2023 р. (а) та 01.09 – 30.09.2023 р. (б)

3.2 Мінливість параметрів аерозолію в атмосферному повітрі

У перший місяць після підриву греблі значення АОТ на території Каховського водосховища та Олешківських пісків складало близько +20% відносно періоду до руйнування. Ці значення скоріше мали типові характеристики змін АОТ на загальному фоні варіацій від -10 до +50% (рис. 3.4),

що простежуються, зокрема, у південно-східній частині досліджуваної території. Таким чином, зростання АОТ у перші тижні після підриву греблі не спостерігалось.

У липні основними змінами було збільшення значень на південний захід від водосховища що можна пов'язати із впливом іншого джерела аерозолів (рис. 3.5). Ймовірно має місце перенесення пилу із видобувних кар'єрів Кривого Рогу. Чітких статистично надійних змін АОТ над територією Каховського водосховища виявити не вдалося.

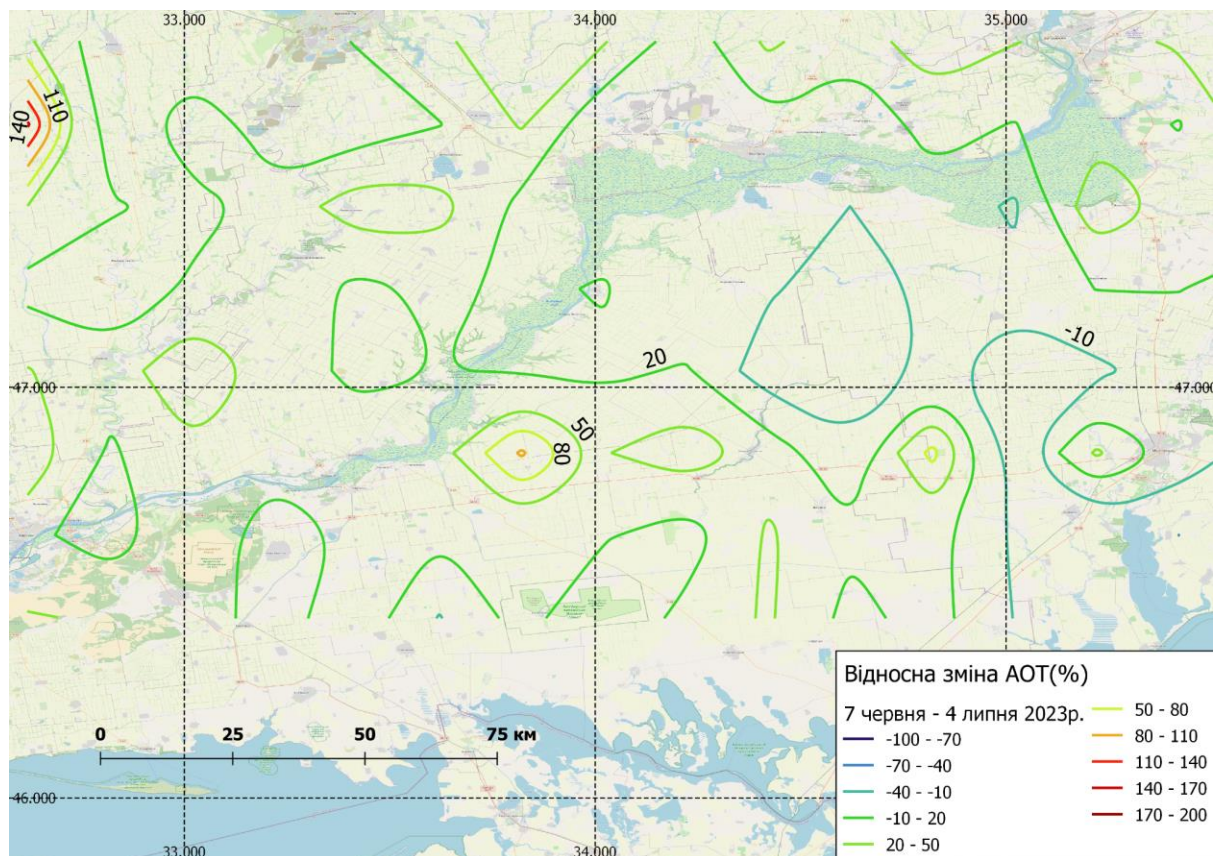


Рис. 3.4 Зміна АОТ (%) протягом 07.06-04.07.2023 р. відносно періоду до підриву греблі Каховської ГЕС

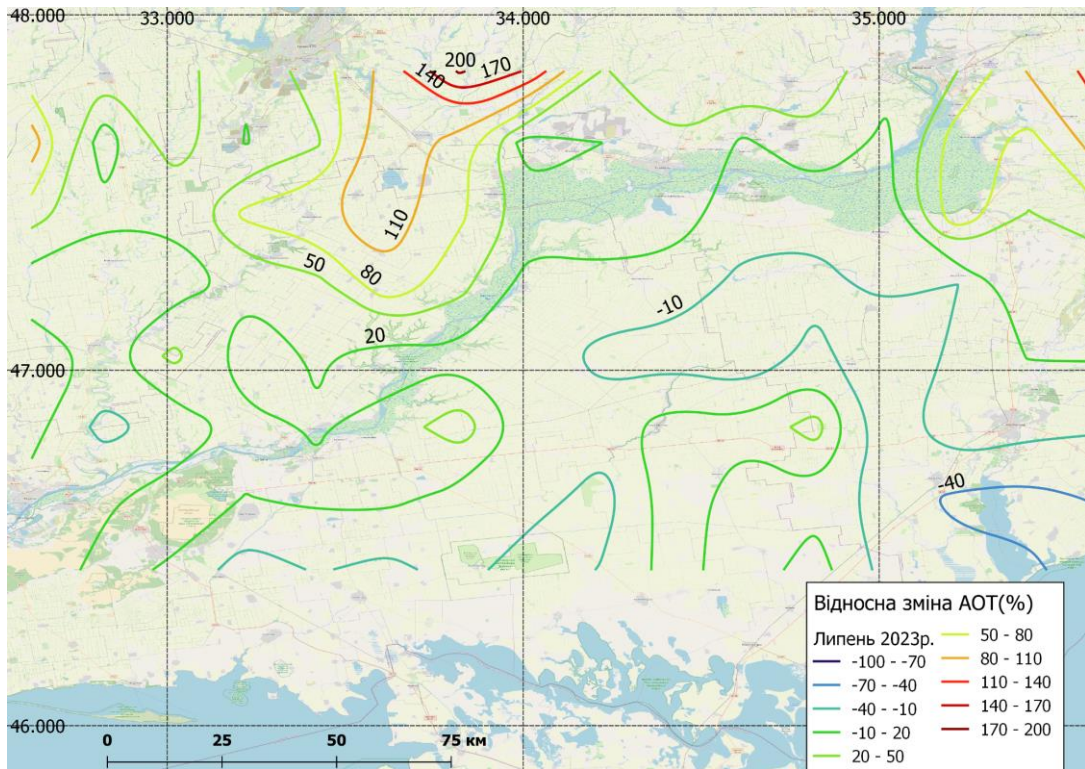


Рис. 3.5 Зміна АОТ (%) протягом липня 2023 р. відносно періоду до підриву греблі Каховської ГЕС

Перші ознаки появи нових осередків емісії аерозолі, що вплинули на зростання АОТ, було зафіксовано в серпні 2023 р. (рис.3.6). За досліджуваний період, коли в середньому регіонально спостерігалось зменшення вмісту на рівні від -20% до -50% відносно періоду до підриву, над осушеними територіями Каховського водосховища значення АОТ залишалися на рівні до 50% у порівнянні з періодом з травня до початку червня.

Над західною та східною частинами водосховища виділилися два центри емісії аерозолі, причому у східній частині спостерігалася вища інтенсивність емісії.

Протягом осені рівень АОТ продовжував зменшуватися порівняно з періодом до підриву греблі. У деяких областях спостерігалось значне зниження аерозольного забруднення на рівні до -80%. Однак відмінною особливістю було те, що над піщаними територіями Каховського водосховища та Олешківських

пісків сезонне зниження мало значення -20%, що свідчить про більш інтенсивне надходження пилу в цих районах та їхню схожість між собою.

У вересні значення АОТ над Олешківськими пісками змінились на -10%, тоді як над східною частиною Каховського водосховища це значення становило +20% відносно періоду до підриву греблі (рис. 3.7).

У період з 1 жовтня по 8 листопада 2023 року добре видно перевищення локальної емісії аерозолі над Каховським водосховищем навіть порівняно з показниками, зафіксованими над Олешківськими пісками (рис. 3.8).

Таким чином, прослідкувати вплив емісії аерозолі на АОТ можна за відносними значеннями. Тоді як спостерігається сезонне регіональне зменшення АОТ, цей процес набагато повільніше протікає саме над осушеними ділянками Каховського водосховища.

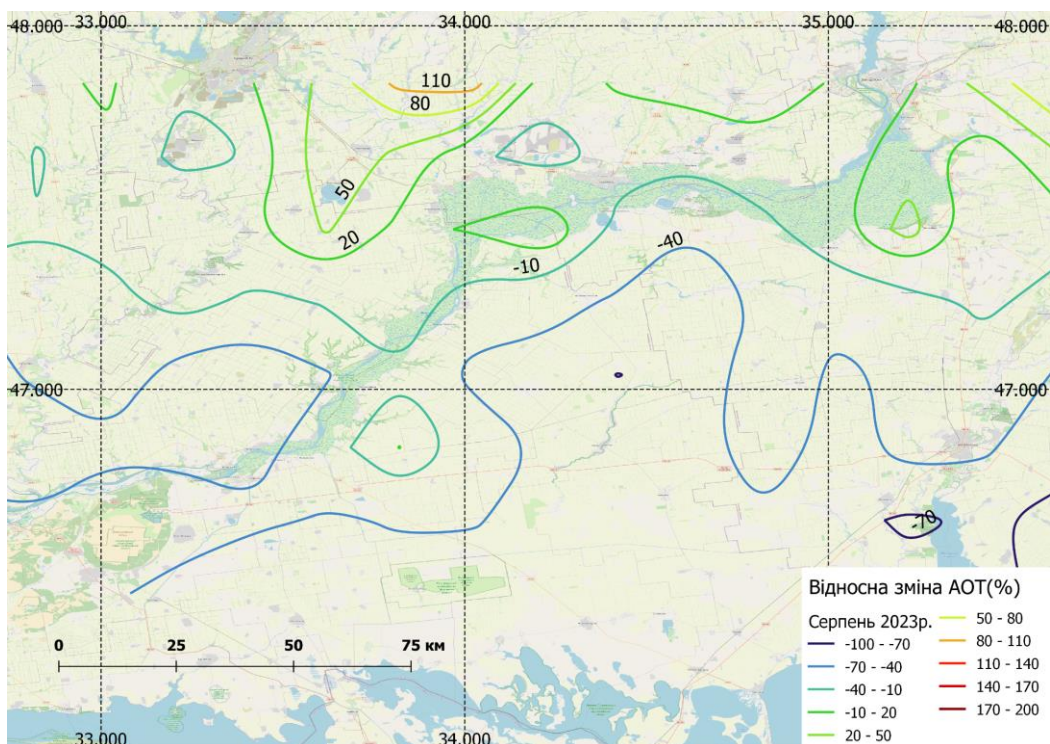


Рис. 3.6 Зміна АОТ (%) протягом серпня 2023 р. відносно періоду до підриву греблі Каховської ГЕС

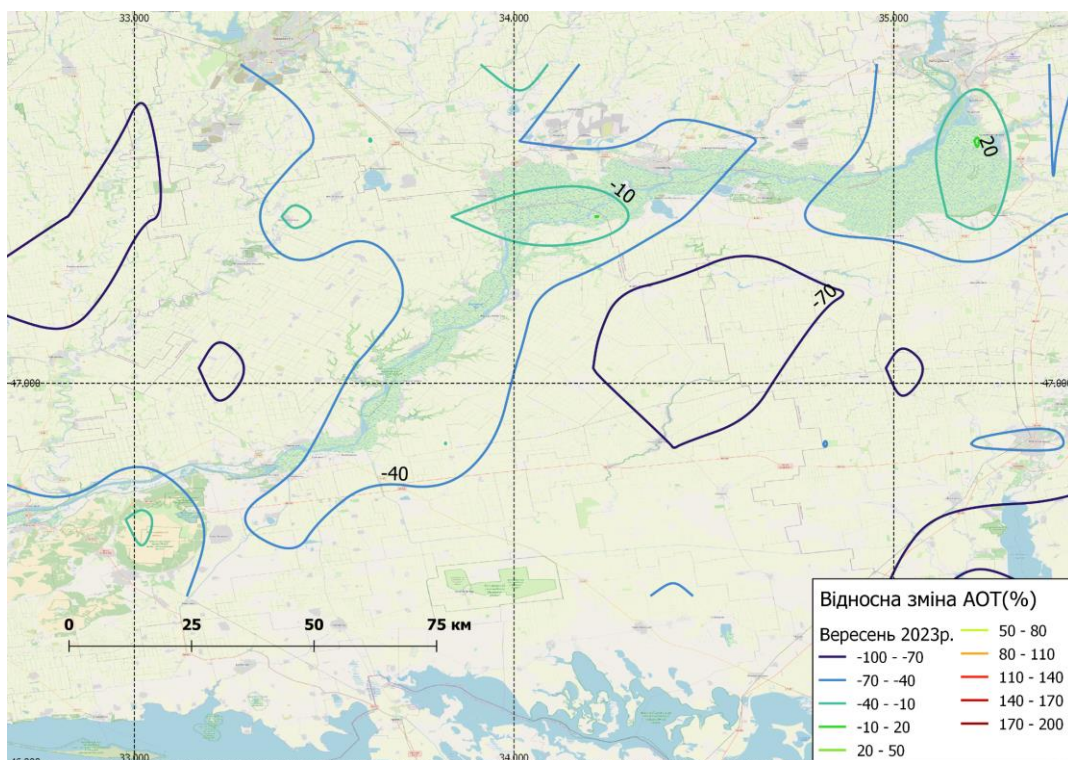


Рис. 3.7 Зміна АОТ (%) протягом вересня 2023 р. відносно періоду до підриву греблі Каховської ГЕС

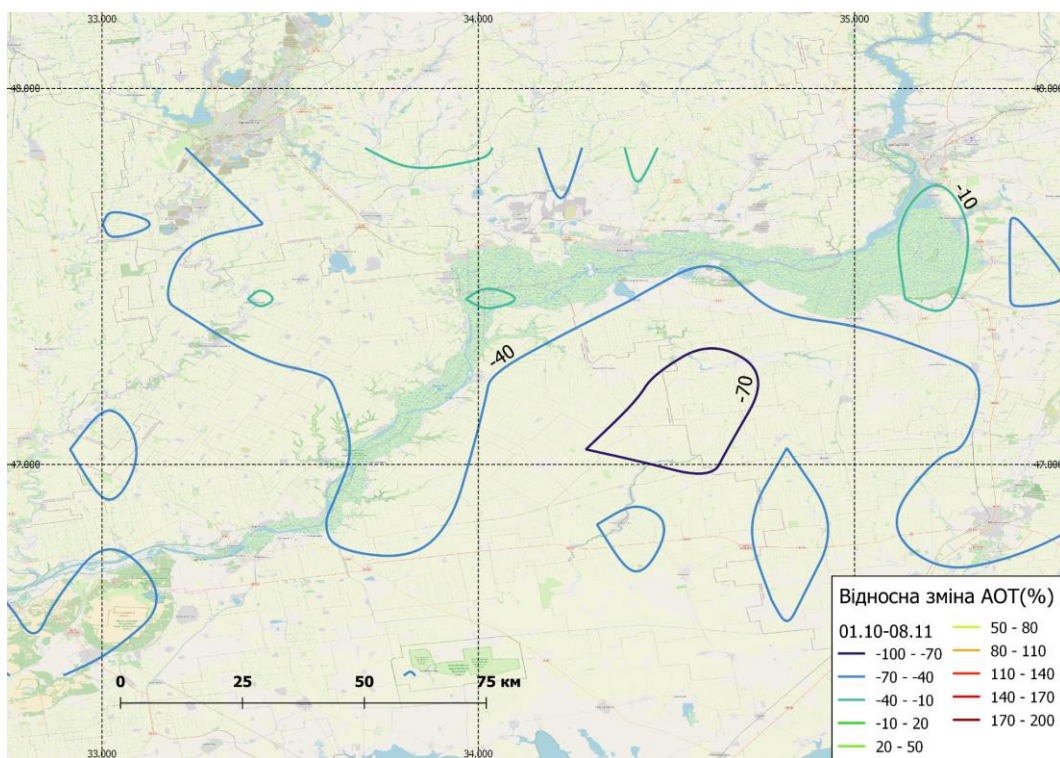


Рис. 3.8 Зміна АОТ (%) протягом жовтня - 08.11.2023 р. відносно періоду до підриву греблі Каховської ГЕС

Перехід від параметра оптичної товщини аерозолю (АОТ) до масової концентрації аерозольних часток (МЧА) став необхідним з метою отримання більш точного уявлення про кількість аерозолю в атмосфері. АОТ, хоч і є базовим показником, має свої обмеження у відображенні справжнього обсягу аерозольних часток. Таким чином, для більш детального аналізу був використаний параметр МЧА (див. рис. 3.9 – 3.14).

До 5 червня, типові фонові значення масової частки аерозолю коливалися від 4×10^{-6} г/см² до 18×10^{-6} г/см² (див. рис. 3.9). У той же час над територією Олешківських пісків ці значення зберігалися на рівні до 11×10^{-6} г/см². Масова частка аерозолю над Каховським водосховищем не виявляла локальних мінімумів і могла досягати приблизно 13×10^{-6} г/см², що здебільшого перевищувало фоновий вміст.

Розташування осередків аерозолю поблизу узбережжя може бути наслідком викидів аерозолю, що створюються під час діяльності промислових підприємств, таких як Нікополь, Марганець та Енергодар. Однак, крім цього, інтенсивна емісія аерозолю також може мати місце поблизу солоних озер та лиманів на півдні України, що сприяє збільшенню максимальних значень масової частки аерозолю в цьому регіоні.

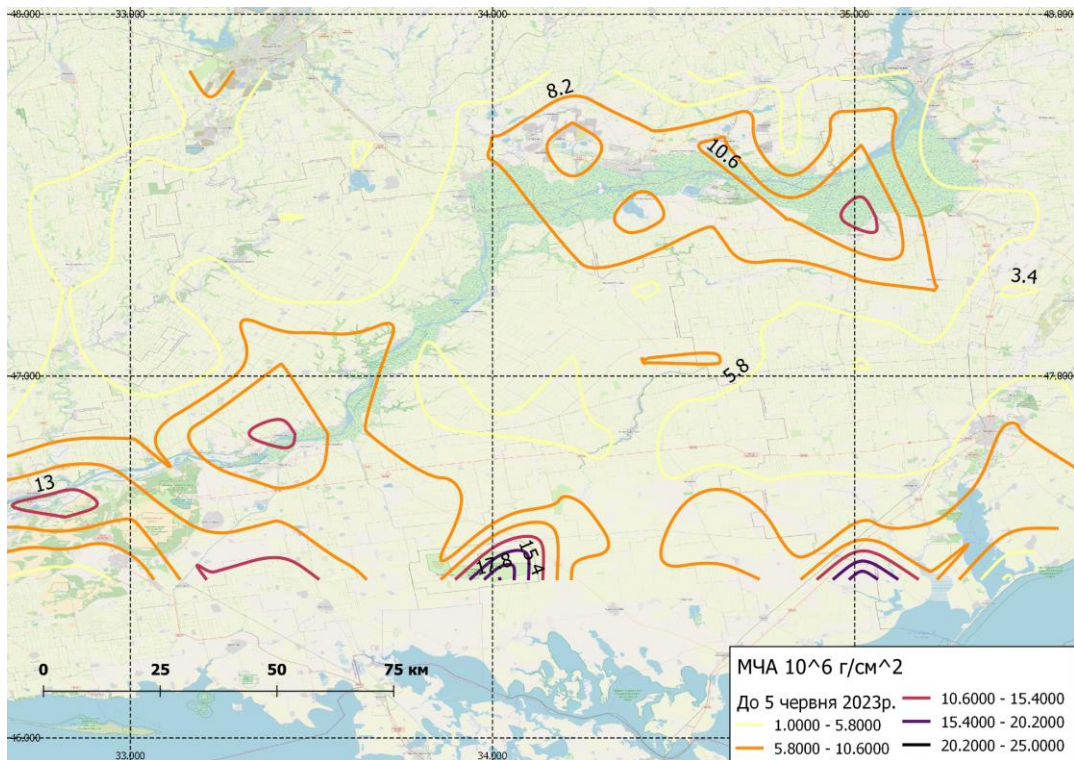


Рис. 3.9 Середня МЧА (10^{-6} г/см²) до підриву греблі Каховської ГЕС

У період з 07.06-04.07 одразу спостерігається загальне збільшення концентрації аерозолі в атмосфері, але конкретні осередки або їх особливості ідентифікувати в цей момент неможливо (рис. 3.10).

У липні були виявлені нетипові осередки з високим вмістом масової частки аерозолі, які сягають значень близько 25×10^{-6} г/см², що перевищує значення, зафіксовані над Олешківськими пісками, де вміст аерозолі становить приблизно 20×10^{-6} г/см² (рис. 3.11).

У серпні і восени видно наслідки осушення Каховського водосховища. У цей період спостерігається збільшення МЧА, що є чітким наслідком цього процесу. Зміни МЧА, які спостерігаються восени, подібні до тих, що мають місце над Олешківськими пісками. Однак абсолютні значення МЧА набагато вищі, що свідчить про значно інтенсивніше надходження піщаного аерозолі (рис. 3.12-3.14).

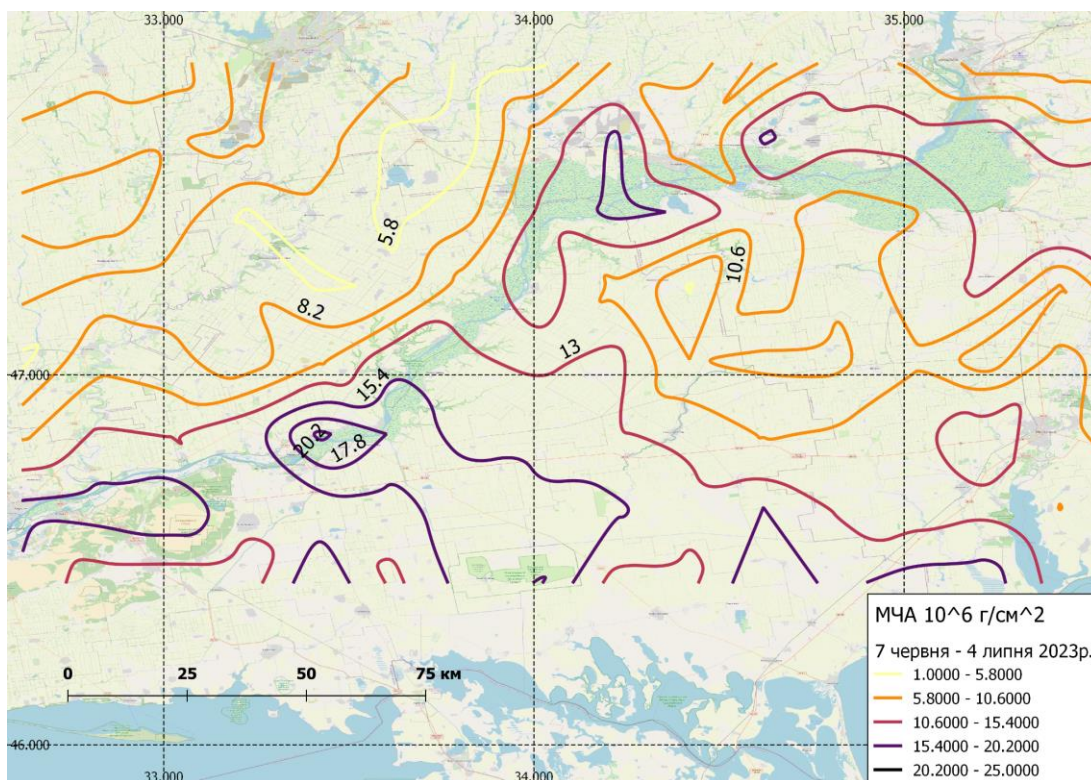


Рис. 3.10 Середня МЧА (10^{-6} г/см²) протягом 07.06-04.07.2023 р.

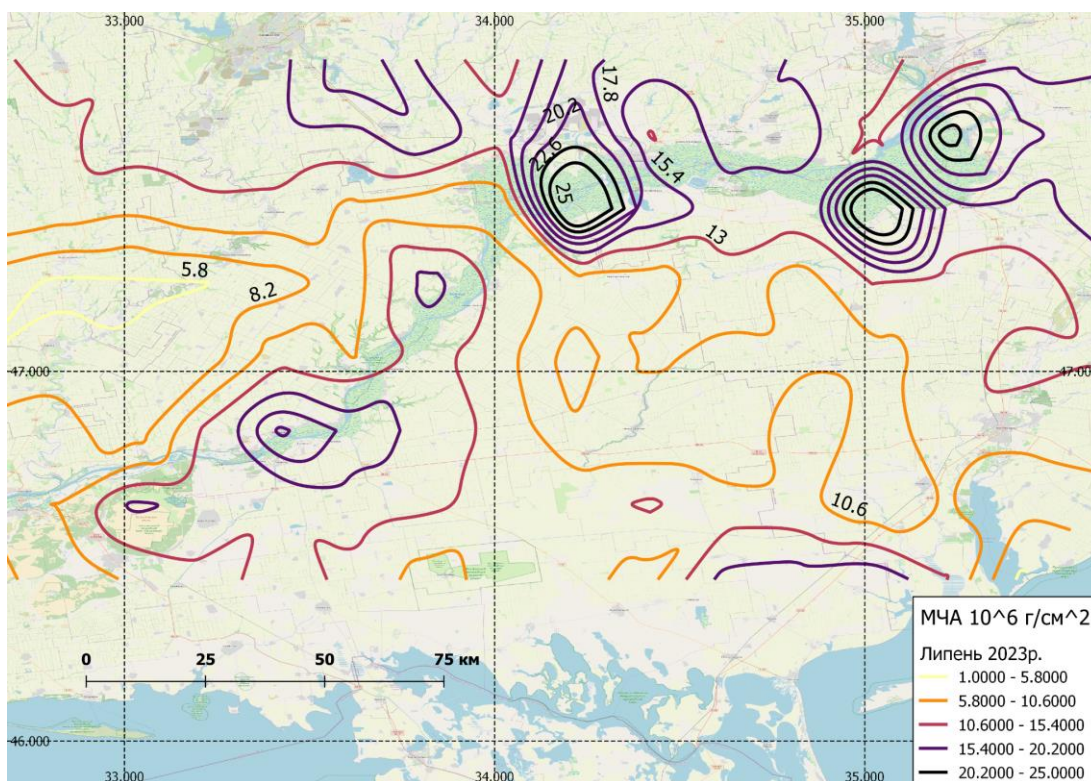


Рис. 3.11 Середня МЧА (10^{-6} г/см²) у липні 2023 р.

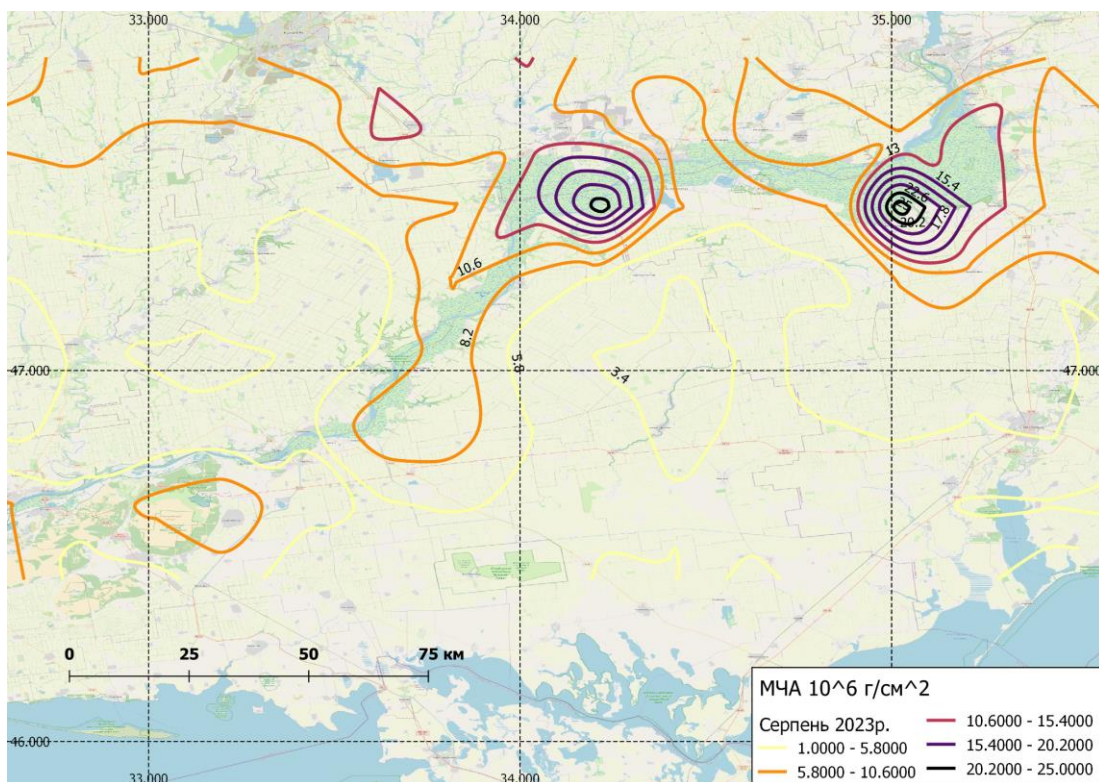


Рис. 3.12 Середня МЧА (10^{-6} г/см²) у серпні 2023 р.

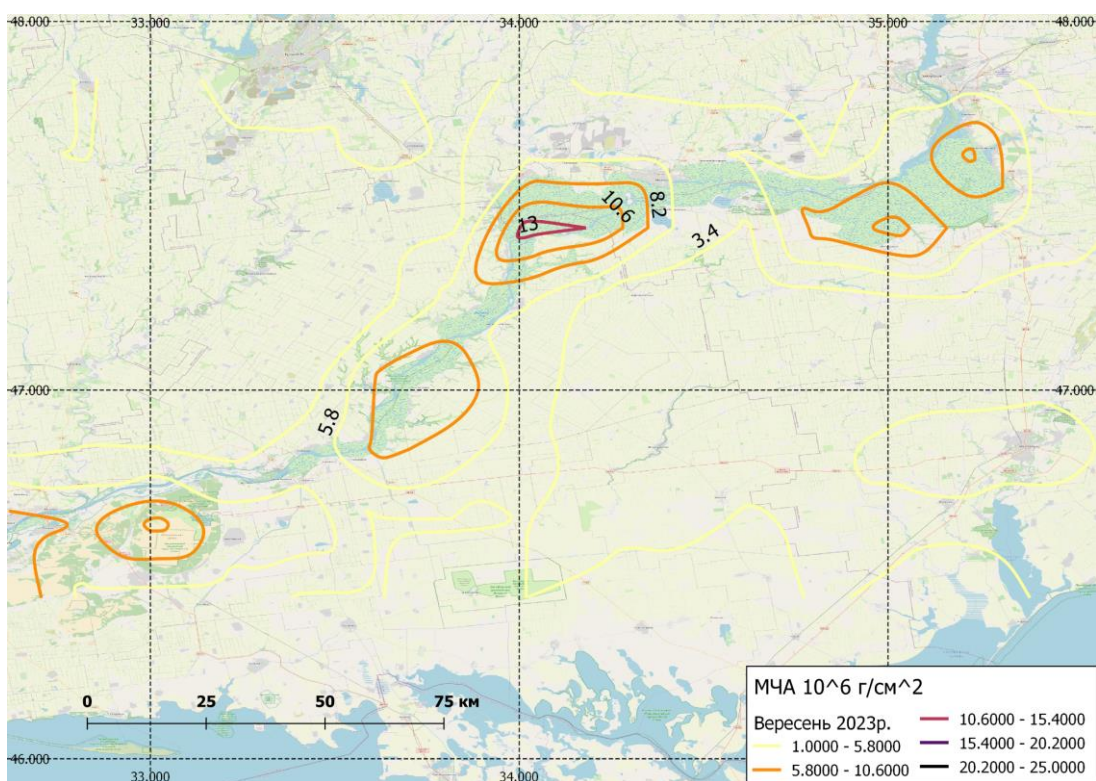


Рис. 3.13 Середня МЧА (10^{-6} г/см²) у вересні 2023 р.

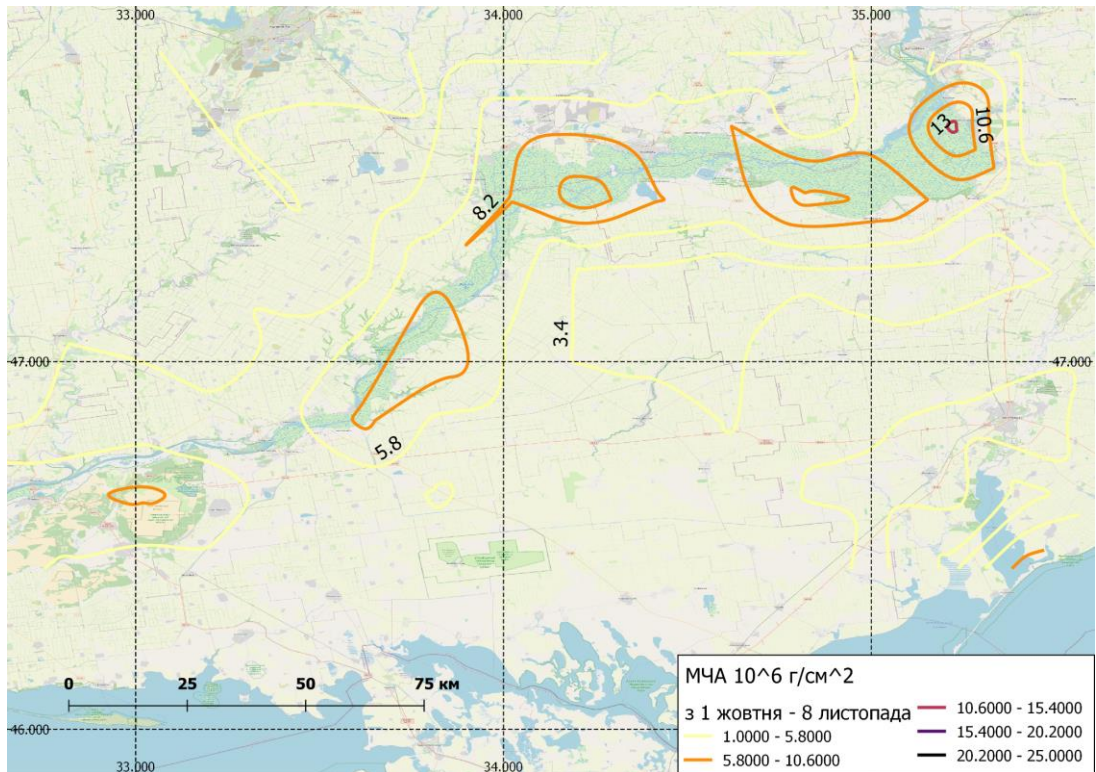


Рис. 3.14 Середня МЧА (10^{-6} г/см²) у жовтні - 08.11.2023 р.

Обчислення змін експоненти Ангстрема здійснено для всієї досліджуваної області (усіх вузлів регулярної сітки координат). Проте, з метою пояснення змін, спричинених осушенням Каховського водосховища та надходження мінерального пилу, обрано окремі вузли на прикладі яких проведений аналіз. Так, виокремлено вузли сітки, що розташовані на відстані від Каховського водосховища на право- та лівобережжі р. Дніпро (рис. 3.15), з метою аналізу фонових змін, що не залежать від процесів на території колишнього Каховського водосховища. Додатково проаналізовано вузол сітки, значення якого потрапляє на Олешківські піски, що слугують у наших дослідженнях як еталонна ділянка із постійною емісією аерозолу (рис. 3.16). Для дослідження змін у районі Каховського водосховища обрано усі вузли сітки, які повністю або частково покривають його територію (рис. 3.17). На кожному із графіків наведено чотири діапазони експоненти Ангстрема, і кольорами позначено зміну повторюваності

потрапляння у ці діапазони (у %) протягом різних періодів відносно періоду до підриву греблі.

Загалом, для досліджуваного періоду над усією досліджуваною територією, характерне зростання повторюваності великих часток (експонента Ангстрема в діапазоні 0–0,5) та зменшення повторюваності дрібних часток (діапазон 1,5–2,0). Це ускладнює проведення аналізу, так як подібну тенденцію очікуємо спостерігати над територією осушеного Каховського водосховища. У проміжних діапазонах 0,5–1,0 та 1,0–1,5 відсутня загальна тенденція над усім досліджуваним регіоном, і зміни залежать від розташування вузлів сітки.

На обраних вузлах сітки, що характеризують фонові зміни розміру часток, зростання повторюваності грубодисперсного аерозолі влітку 2023 р. складало близько 10–40% (рис. 3.15). Якщо на правобережжі починаючи з вересня повторюваність експоненти Ангстрема в діапазон 0–0,5 починає стрімко падати (приблизно до -10% у порівнянні із періодом до підриву греблі), то на лівобережжі зміна повторюваності великих аерозольних часток зростає і складає близько 20%. Інтенсивність зменшення повторюваності дрібної фракції 1,5–2,0 з червня по вересень складало від -20% і нижче. Проміжні фракції із розміром аерозольних часток в діапазоні експоненти Ангстрема 0,5–1,0 зростали на лівобережжі та незначно змінювалися на правобережжі. Для діапазону 1,0–1,5 зміни повторюваності експоненти Ангстрема були протилежні.

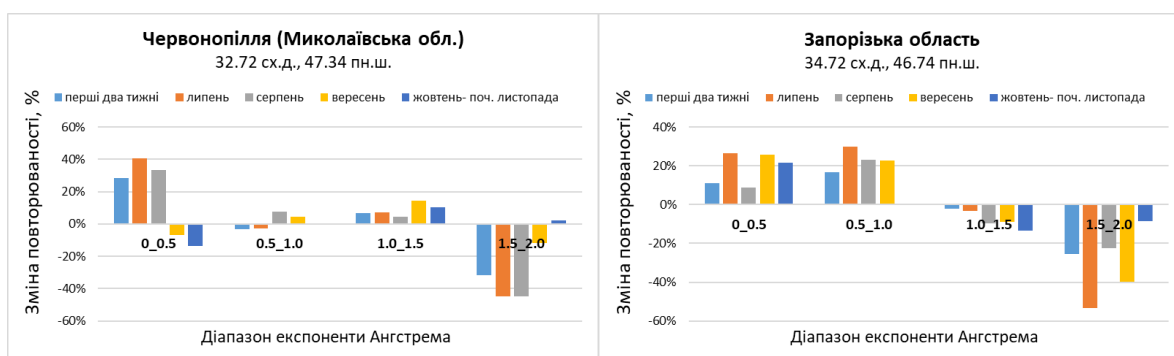


Рис. 3.15 Зміна повторюваності (у %) потрапляння експоненти Ангстрема у певну градацію відносно періоду до підриву греблі над територіями на відстані від Каховського водосховища

Схожа до фонових значень спостерігалася ситуація над Олешківськими пісками (рис. 3.16). Грубодисперсні частки зростали протягом усього періоду (за винятком серпня) більше ніж на 15%. Повторюваність експоненти Ангстрема в діапазоні 0,5–1,0 також зростали до жовтня, з особливо значними змінами у серпні, що перевищували 20%. Варто зауважити, різке зменшення повторюваності цього діапазону у жовтні – листопаді (<-30%). Усі розміри часток, що експонента Ангстрема для яких перевищує 1,0 характеризувалися зменшенням протягом червня – вересня.

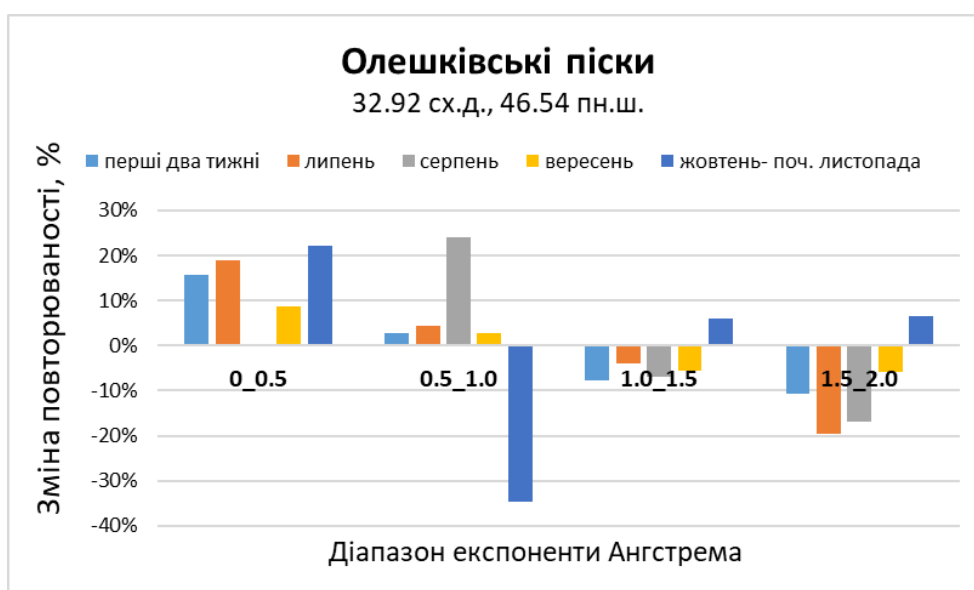


Рис. 3.16 Зміна повторюваності (у %) потрапляння експоненти Ангстрема у певну градацію відносно періоду до підриву греблі над Олешківськими пісками

Знаючи зміни, що відбулися у фоні та над Олешківськими пісками, можна дослідити ті зміни, що були характерні саме для території Каховського водосховища. Як було зазначено вище, загальні тенденції подібні (див. рис. 3.17), за винятком одного вузла сітки (рис. 3.17e), розташованого ближче до території Запоріжжя, що лише частково охоплював територію Каховського водосховища. Враховуючи близькість до промислових об'єктів Запоріжжя та лінії фронту,

результати за даними цього вузла сітки варто виокремлювати від інших вузлів через ймовірно різну емісію аерозолі у порівняння з іншими ділянками.

У порівнянні із вузлами сіток інших територій (рис. 3.15-3.16), для Каховського водосховища, що потрапляють на ділянки із появою значних піщаних мас (див. п. 3.1) характерне ще більше зростання повторюваності появи великих часток, що може переважати 50% відносно періоду до підриву греблі (рис. 3.17в). Зростання повторюваності експоненти Ангстрема у діапазоні 0–0,5 у липні – серпні переважають тут наслідки емісії над Олешківськими пісками.

У порівнянні з “еталонною” ділянкою Олешківські піски, зменшення повторюваності експоненти Ангстрема в діапазоні 1,5–2,0 є більш інтенсивним саме над осушеними ділянками Каховського водосховища (напр., рис. 3.17а,б,в,д), часто будучи інтенсивнішим за -20% влітку. З високою ймовірністю це також відображає наслідки зменшення повторюваності аерозолів інших типів (напр., сульфатів, що мають дрібніші розміри) над Каховським водосховищем. Проте, з впевненістю про ці наслідки можна стверджувати лише на довшому періоду спостережень у майбутньому, щоб точно відокремити ці процеси від фонових змін, де також подекуди спостерігалось інтенсивне зменшення в діапазоні 1,5–2,0.

На основі аналізу діапазонів експоненти Ангстрема, що охоплюють від 0,5 до 1,5, неможливо за наявними даними зробити однозначні висновки щодо їх змін.

Таким чином, досліджувані аерозольні параметри чітко вказують на формування додаткового джерела пилу над осушеними ділянками Каховського водосховища. Незважаючи на поширення рослинності по дну колишнього водосховища через кілька місяців після підриву греблі, поки що не спостерігаються умови сприятливі для перешкоджання надходження мінерального пилу. У найближчому майбутньому прилеглі міста можуть опинитися під впливом пилових бурь за умов високих швидкостей вітру. Незалежно від майбутніх дій щодо відновлення греблі чи створення заповідних

територій, необхідно розроблення планів пилезахисту та пизезатримки над досліджуваними ділянками.

Частина результатів, представлених у даній роботі опубліковано автором у статті [45].

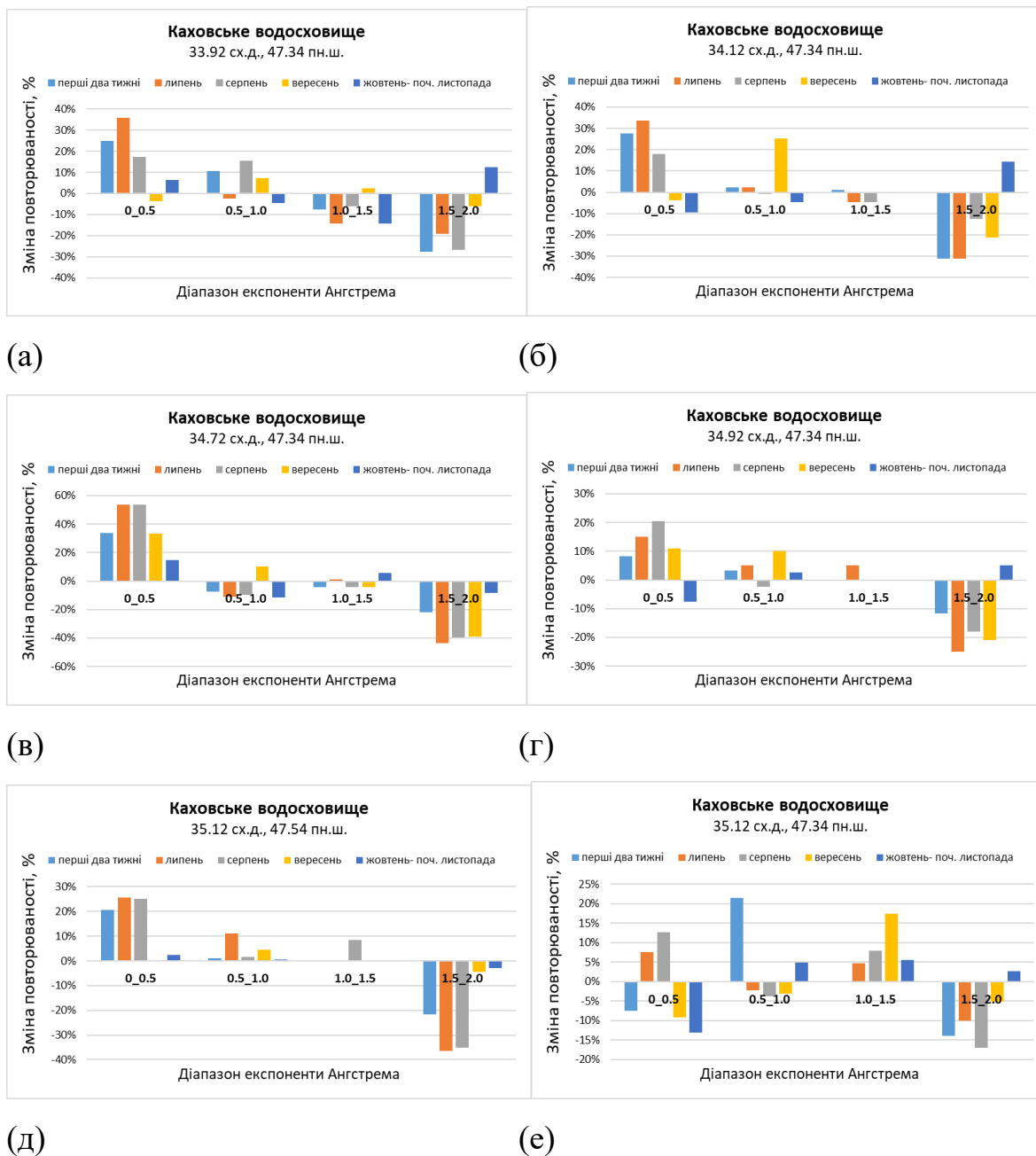


Рис. 3.17 Зміна повторюваності (у %) потрапляння експоненти Ангстрема у певну градацію відносно періоду до підриву греблі усіма вузлами сітки, що потрапляють на територію Каховського водосховища

3.3 Висновки до Розділу 3

Встановлено особливості змін підстильної поверхні в районі Каховського водосховища, зокрема за періоди висихання, формування піщаних зон та поширення рослинності. Площі піщаних територій на осушених ділянках Каховського водосховища перевищують площу Олешківських пісків.

Виявлено додаткову емісію пилу із осушених ділянок Каховського водосховища, внаслідок якої в атмосфері формуються у 2-3 рази вищі значення МЧА та не спостерігається узгодження із регіональним сезонним зменшенням АОТ.

На основі дослідження експоненти Ангстрема над окремими вузлами сітки Каховського водосховища виявлено більш інтенсивне за фонове зростання повторюваності значень в діапазоні 0-0.5, що свідчить про зростання кількості великих розмірів часток характерних для мінерального пилу. Повторюваність настання таких випадків над осушеними ділянками Каховського водосховища перевищує таку повторюваність над Олешківськими пісками.

Проведені дослідження свідчать про необхідність проведення заходів щодо пилезахисту прилеглих до Каховського водосховища територій після завершення воєнних дій, задля зменшення ймовірності настання пилових бурь.

ВИСНОВКИ

У результаті проведення досліджень встановлено особливості емісії і варіативності аерозолі в атмосферному повітрі над територією колишнього Каховського водосховища.

1. Здійснено узагальнення сучасних підходів до аналізу аерозолі в атмосферному повітрі, зокрема за даними супутникового зондування. Встановлено, що для території осушеного Каховського водосховища досліджень емісії пилу не проводилися.

2. На основі даних супутникових спостережень Terra та Landsat із використанням геоінформаційних систем, розроблено методологію дослідження емісії мінерального пилу за даними АОТ, експоненти Ангстрема та МЧА.

3. Встановлено особливості змін підстильної поверхні в районі Каховського водосховища, зокрема за періоди висихання і формування піщаних зон у червні – липні 2023 р., та поширення рослинності починаючи із серпня 2023 р. До кінця досліджуваного періоду, рослинність покрила західні, північні та, частково, південні частини колишнього водосховища, тоді як піщані відклади зберігаються в центральній та східній частинах. Незважаючи на поширення рослинності, площі піщаних територій станом на листопад 2023 р. перевищували площу Олешківських пісків.

4. Виявлено додаткову емісію пилу із осушених ділянок Каховського водосховища, внаслідок якої в атмосфері формуються у 2-3 рази вищі значення МЧА, що досягали близько 25×10^{-6} г/см² в літні місяці, та 13×10^{-6} г/см² в осінні. Формування нових осередків емісії пилу над Каховським водосховищем призвело до неузгодження зміни АОТ із фоновим сезонним зменшенням. У той час як АОТ в регіоні зменшилося до -80%, над піщаними територіями Каховського водосховища та Олешківських пісків сезонне зниження досягало лише -20%, що свідчить про більш інтенсивне надходження мінерального пилу.

5. На основі дослідження експоненти Ангстрема над окремими вузлами сітки Каховського водосховища виявлено більш інтенсивне за фонове (до 60%) зростання повторюваності значень в діапазоні 0-0.5, що свідчить про додаткове

надходження часток великих розмірів, характерних для мінерального пилу. Повторюваність настання таких випадків над осушеними ділянками Каховського водосховища перевищує таку повторюваність над Олешківськими пісками, де повторюваність переважаючих великих часток зросла лише на 20% відносно періоду до підриву греблі.

6. Проведені дослідження свідчать про необхідність проведення заходів щодо пилезахисту прилеглих до Каховського водосховища територій після завершення воєнних дій, задля зменшення ймовірності настання пилових бурь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бовчалюк В., Міліневський Г., Данилевський В. та ін. Властивості аерозолію в атмосфері над Києвом за лідарними та фотометричними спостереженнями. *Космічна наука і технологія*. 2017. Т. 23. №6. с. 34-45
2. Бредіхіна Г. Екоцид масштабу ядерного удару. Наслідки підриву Каховської ГЕС для України. *Уніан*. 06.06.2023. URL: <https://www.unian.ua/ecology/ekocid-masshtabu-yadernogo-udaru-naslidki-pidrivu-kahovskoj-ges-dlya-ukrajini-12284337.html> (Дата звернення: 22.04.2024)
3. Дячук В. А., Баштаннік М. П. Кіптенко Є. М. та ін. Дослідження системи моніторингу забруднення атмосферного повітря в місті Києві та напрямки її удосконалення. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. №4 (55). с. 111-121.
4. Зоопарк у Новій Каховці повністю затоплено: врятувалися лише лебеді та качки/ *Медіа Рішень*. 06.06.2023. URL: <https://rubryka.com/2023/06/06/zoopark-u-novij-kahovtsi-povnistyu-zatopleno-vryatuvalysya-lyshe-lebedi-ta-kachky/> (Дата звернення: 22.04.2024)
5. Крайник С.В., Савенець М.В. Зміна аерозольних параметрів в атмосфері внаслідок надходження пилу з осушених ділянок Каховського водосховища. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2024. № 1 (71). С. 85-95
6. Міліневський Г.П., Ліптуга А.І., Кислий В.П. та ін. Розширена мережа моніторингу аерозолів AirVisual у місті Києві. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: колективна монографія*. Львів: ТзОВ «ЗУКЦ». 2020. с. 140-167
7. НАН України ухвалила постанову «Про екологічні наслідки руйнування греблі Каховської ГЕС». *Укргідроенерго*. 15.09.2023. URL:

- https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/nan-ukrayiny-ukhvalyla-postanovu-pro-ekolohichni-naslidky-ruynuvannya-hrebli (Дата звернення: 22.04.2024)
8. Надточій Л. М., Савенець М. В., Баштаннік М. П., Дворецька І. В. Особливості динаміки забруднення атмосферного повітря пилом у деяких містах України. Український географічний журнал. 2019. Вип. 1 (105). с. 43-50.
 9. Надточій Л. М., Савенець М. В., Дворецька І. В. Міжрічна мінливість забруднюючих речовин в атмосфері промислових міст України. II Міжнародна науково-практична конференція «Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток територій землі: наслідки та шляхи вирішення». 13-14 червня 2019 року. Херсон. с. 124-126
 - 10.Петросян А. А., Маремуха Т. П., Моргульова В. В. Удосконалення та організація автоматизованої системи моніторингу за якістю атмосферного повітря в Україні. Молодий вчений. 2020. №8 (84). с. 97-102.
 - 11.Президія Національної Академії Наук України. Постанова № 313 «Про екологічні наслідки руйнування греблі Каховської ГЕС». м. Київ. 06.09.2023. Режим доступу: <https://files.nas.gov.ua/PublicMessages/Documents/0/2023/09/230915121937204-4928.pdf> (Дата звернення: 22.04.2024)
 - 12.Синявський І. І., Іванов Ю. С., Сосонкін М. Г. та ін. Комплекс наукової апаратури космічного експерименту «АЕРОЗОЛЬ-УА». XX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 18-19 травня 2021 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна. 2021. с. 25
 - 13.Сніжко С. І., Шевченко О. Г. Урбометеорологічні аспекти забруднення повітря великого міста /Сніжко С. І., Шевченко О. Г. – К.: Видавництво географічної літератури «Обрії», 2011. – 297 с.
 - 14.Стахів Є., Демиденко А. Екоцид: катастрофічні наслідки руйнування дамби Каховського водосховища // Вокс Україна. – 19 липня 2023. – Режим

- доступу: <https://voxukraine.org/ekotsyd-katastrofichni-naslidky-rujnuvannya-damby-kahovskogo-vodoshovyshha>
15. Турос О. І., Ковальчук М. П., Ковтуненко І. М. Вплив аероалергенів пилку на формування бронхіальної астми у дітей м. Києва. Молодий вчений. 2021. №2 (90). с. 202-208
 16. Турос О. І., Маремуха Т. П., Кобзаренко І. В. Забруднення атмосферного повітря зваженими частками пилу (ЗЧ10 і ЗЧ2,5) у Деснянському районі м. Києва. Гігієна населених місць. 2017. №67. с. 31-36
 17. Турос О. І., Петросян А. А., Брезіцька Н. В. Оцінка впливу забруднення атмосферного повітря РМ2,5 на здоров'я населення Києва. Environment & Health. 2022. №3. с. 44-47
 18. Шевченко О. Г., Кульбіда М. І., Сніжко С. І. Рівень забруднення атмосферного повітря міста Києва формальдегідом. Український гідрометеорологічний журнал. 2014. Вип. 14. с. 5-15.
 19. Air pollution: measurement, modelling and mitigation / Abhishek Tiwary and Ian Williams. Fourth edition. Boca Raton : CRC Press, 2018. 901 p.
 20. Arfin, Pillai, A.M., Mathew, N. et al. An overview of atmospheric aerosol and their effects on human health. Environ Sci Pollut Res. 2023. Vol. 30. P. 125347-125369.
 21. Aubry, T.J., Staunton-Sykes, J., Marshall, L.R. et al. Climate change modulates the stratospheric volcanic sulfate aerosol lifecycle and radiative forcing from tropical eruptions. Nat Commun. 2021. Vol. 12. P. 4708. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-24943-7>
 22. Dubovik, O., Schuster, G.L., Feng, X. Grand Challenges in Satellite Remote Sensing. Specialty Grand Challenge. 2021. Vol. 2. 10 p.
 23. Dubovik, O., Z. Li, M.I. Mishchenko, et al. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: instruments, methodologies, results, and perspectives. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2019. Vol. 224. p. 474-511

24. Goodsite, M.E., Johnson, M.S., Hertel, O. (eds) Air Pollution Sources, Statistics and Health Effects. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series. Springer, New York, NY. p. 529
25. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18-27
26. Hallquist, M., Wenger, J. C., Baltensperger, U., et al. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues, *Atmos. Chem. Phys.* 2009. Vol. 9. P. 5155-5236.
27. Hinds, W. C. *Aerosol Technology, Properties, Behaviour, and Measurement of Airborne Particles*. John Wiley & Sons Inc., New York. 1999.
28. Janssens-Maenhout, G., et al. Toward an Operational Anthropogenic CO₂ Emissions Monitoring and Verification Support Capacity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2020. Vol. 101. P. 1439-1451.
29. Kelkar, R.R. *Satellite meteorology*. BS Publications. 2007. 267 p.
30. Kok, J.F., Storelvmo, T., Karydis, V.A. et al. Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change. *Nat Rev Earth Environ*. 2023. Vol. 4. p. 71-86.
31. Laid to waste. Ukrainian scientists are tallying the grave environmental consequences of the Kakhovka Dam disaster. *Nature*. 2024. <https://doi.org/10.1126/science.zbde496>
32. Lazaridis, M. *First Principles of Meteorology and Air Pollution*. 2010. Vol. 19. p. 373
33. Levy, R., Hsu, C., et al. MODIS Atmosphere L2 Aerosol Product. NASA MODIS Adaptive Processing System. Goddard Space Flight Center, USA. 2015.
34. Marshall, L.R., Maters, E.C., Schmidt, A. et al. Volcanic effects on climate: recent advances and future avenues. *Bull Volcanol*. 2022. Vol. 84. P. 54.
35. Murphy, D. M., Froyd, K. D., Bian, H., et al. The distribution of sea-salt aerosol in the global troposphere, *Atmos. Chem. Phys.* 2019. Vol. 19. p. 4093-4104.

36. Myhre, G., Myhre, C. E.L., Samset, B. H. & Storelvmo, T. Aerosols and their Relation to Global Climate and Climate Sensitivity. *Nature Education Knowledge*. 2013. Vol. 4(5):7. URL: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/aerosols-and-their-relation-to-global-climate-102215345/>
37. NASA. "Aerosols: Small Particles with Big Climate Effects." *Global Climate Change*. <https://climate.nasa.gov/explore/ask-nasa-climate/3271/aerosols-small-particles-with-big-climate-effects/>.
38. Sarvajayakesavalu, S. *Advances in Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. 108 p.
39. Savenets, M., Pysarenko, L., Krakovska, S. et al. Enviro-HIRLAM model estimates of elevated black carbon pollution over Ukraine resulted from forest fires. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 22. p. 15777-15791.
40. Scarlatti, F.; Gómez-Amo, J.L.; Valdelomar, P.C.; et al. A Machine Learning Approach to Derive Aerosol Properties from All-Sky Camera Imagery. *Remote Sens*. 2023. Vol. 15. p. 1676.
41. Shandilya, K., Khare, M. *Particulate Matter: Sources, Emission Rates and Health Effects. Environmental and Agricultural Researcher Biographical Sketches and Research Summaries. Volume 1. Environmental Research Advances*. 2014.
42. Thakur S.N., Singh, J.P., Baruah G. Chapter 18 - Photoacoustic spectroscopy of atmospheric pollutants and biomarker gases. *Photoacoustic and Photothermal Spectroscopy. Principles and Applications*. 2023. Elsevier. P. 399-416. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91732-2.00027-6>
43. The role of Aerosols in SARS-CoV-2 Transmission. National COVID-19 Science Task Force (NCS-TF). URL: https://scienctaskforce.ch/wp-content/uploads/2020/11/The_role_of_aerosols_in_SARS-CoV-2Transmission29Oct20-EN.pdf (Accessed: 08.01.2024)

44. Tossi R., Novakov T. The lifetime of aerosols in ambient air: Consideration of the effects of surfactants and chemical reactions. *Atmospheric Environment*. 1985. Vol. 19, Is. 1. p.127-133.
45. Verma, S., Prakash, D., Soni M. *Atmospheric Aerosols Monitoring: Ground and Satellite-Based Instruments*. 2018. p. 108.